



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

Identificación de patrones del índice de salud de la vegetación - caso estudio: Provincia Canchis de la región Cusco - Perú (2000 - 2017)

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Gisell Indira CARBAJAL DOMINGUEZ

ASESOR

Mg. Octavio FASHÉ RAYMUNDO

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Carbajal, G. (2020). *Identificación de patrones del índice de salud de la vegetación - caso estudio: Provincia Canchis de la región Cusco - Perú (2000 - 2017)*. Tesis para optar el título de Licenciado en Física. Escuela Profesional de Física, Facultad de Física, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código ORCID del autor	—
DNI o pasaporte del autor	DNI 42751949
Código ORCID del asesor	0000-0002-6743-7800
DNI o pasaporte del asesor	DNI 10451868
Grupo de investigación	GI CTCLIMA y Agua Andes
Agencia financiadora	Autofinanciado
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lugar provincia de Canchis de la región Cusco. Coordenadas geográficas: 70°46' W a 71°34' W de longitud y 13° 30'S a 14°56' S de latitud.
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 y 2018.
Disciplinas OCDE	<p>1.05.11 -- Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11</p> <p>1.05.04 -- Geoquímica, Geofísica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04</p> <p>1.05.10 -- Investigación climática http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10</p>



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADA EN FÍSICA

Siendo las 09:00 horas del miércoles 02 de setiembre del 2020, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz (Presidente), Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe (Miembro), Mg. Octavio Fashé Raymundo (Asesor) y, el Lic. José Carlos Eche Llenque (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Licenciada en Física, mediante la Modalidad M1- Por Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional, de la Bachiller:

GISSELL INDIRA CARBAJAL DOMINGUEZ

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como el Resumen del Expediente e invitó a la citada Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada:

“Identificación de patrones del índice de salud de la vegetación - caso estudio: Provincia Canchis de la región Cusco - Perú (2000 - 2017)”

Concluida la exposición de la candidata y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó a la Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz invitó a la candidata y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por la bachiller, la misma que ha sido de:

18

.....
(NÚMERO)

DIECIOCHO

.....
(LETRAS)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciada en Física a la Bachiller Gisell Indira Carbajal Domínguez.

Siendo las 10:10 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 02 de setiembre de 2020.

Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz
PRESIDENTE

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe
MIEMBRO

Lic. José Carlos Eche Llenque
MIEMBRO SUPLENTE

Mg. Octavio Fashé Raymundo
ASESOR

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

ENLACE:

<https://us02web.zoom.us/j/81325400690?pwd=MTFQZENnbHYvSXpjRVh3TUZsSOVIQT09>

ID: 813 2540 0690

CÓDIGO DE ACCESO: 719253

Grabación archivada en:

<https://www.facebook.com/watch/?v=748456695725979&extid=wlTobgHqNj0kDq1s>

Dedicatoria

*A Dios, mi madre Esther, mi padre Celedonio, mis hermanos Jonathan, Ángela y Lucía y
a mis sobrinas Johana y Kira.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mi asesor de tesis, Mg. Octavio Fashé Raymundo, por apoyarme en todo momento en la elaboración de mi tesis de licenciatura, por sus enseñanzas, sugerencias y su paciencia ante las consultas realizadas por mi persona y por sus valiosos comentarios en la elaboración de la tesis.

Agradezco al Dr. Bram Leo Willems, por apoyarme en el momento de mi investigación de la tesis.

Agradezco al MINAGRI en especial al Ing. Eduardo Arévalo del área de estadística agrícola por facilitarme los datos de producción, superficie cosechada, rendimiento de los cultivos de la provincia de Canchis de la región Cusco.

Al SENAMHI y al observatorio nacional de sequía por facilitarme los datos de precipitación de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.

RESUMEN

El índice de salud de la vegetación (ISV) ha sido ampliamente utilizado para monitorear y caracterizar las sequías. Es decir, el ISV integra dos productos adquiridos del sensor MODIS en su paso diurno, del periodo 2000-2017 a una resolución espacial de 1 km del satélite Terra (MOD13A3 y MOD11A2, versión 6); como son: el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el LST (Land Surface Temperature). El ISV toma en cuenta en términos de fluctuaciones entre los máximos y mínimos del NDVI y la TSS (temperatura superficial del suelo). Este índice se estima como la suma ponderada del índice de condición de vegetación (ICV) e índice de condición térmica (ICT), como no existe un conocimiento a priori acerca de las contribuciones de la vegetación y la temperatura, el ISV se toma típicamente como el promedio de ambas contribuciones, es decir, un peso de 0.5. En el presente trabajo tiene como objetivo identificar ante la ocurrencia de eventos de sequía agrícola y sequía meteorológica patrones relevantes.

En el presente trabajo se presenta los resultados de la serie de tiempo del NDVI, TSS, ISV, ICV e ICT, se identifican los eventos de sequía severa, moderada y leve registrados en los años 2000, 2005, 2008 y 2016. Asimismo, los años con déficit de precipitación son 2000, 2004 - 2006, 2008 y 2015, una correlación entre NDVI y la precipitación con un lags de cero meses es 0.58, con un lags de un mes es 0.84, con un lags de dos meses es 0.85 y con un lags de tres meses es 0.62. Por su parte, los patrones espaciales del ISV revelan que, en el 2000, el 95% presentaron condiciones de sequía severa, moderada y leve, y en el 2005 fue el 93.5%, el 2008 el 87.9%, el 2009 el 78%, el 2010 el 81.5% y el 2016 llegó al 20.7%. Donde la sequía severa, moderada y leve, está representada por los valores menores a 40, además muestra que los años 2000, 2005 y 2008 fueron años de sequía. Se evaluaron los índices de la serie de tiempo del NDVI con la producción, superficie cosechada y rendimiento, presenta una correlación de 0.84, 0.78 y 0.80 respectivamente, mientras la serie de tiempo del ICV, presenta una correlación de 0.81, 0.72 y 0.80 respectivamente y la serie de tiempo del ISV, presenta una correlación de 0.73, 0.60 y 0.75 respectivamente.

Palabras claves: sequía, ISV, ICV, ICT, NDVI, TSS y MODIS.

ABSTRACT

The vegetation health index (ISV) has been widely used to monitor and characterize droughts. That is, the ISV integrates two products obtained from the MODIS sensor at a spatial resolution of 1 km in the 2000-2017 period aboard the Terra satellite (MOD13A3 and MOD11A2, version 6) obtained in its daytime pass; such as: the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and the LST (Land Surface Temperature). The ISV takes into account in terms of fluctuations between the maximum and minimum of the NDVI and the TSS (Land Surface Temperature). This index is estimated as the weighted sum of the vegetation condition index (ICV) and thermal condition index (ICT), as there is no a priori knowledge about the contributions of vegetation and temperature, the ISV is typically taken as the average of both contributions, that is, a weight of 0.5. This paper aims to identify patterns relevant to the occurrence of agricultural drought and meteorological drought events.

The results of this thesis shows the results of the NDVI, TSS, ISV, ICV and ICT time series, the severe, moderate and mild drought events recorded in the years 2000, 2005, 2008 and 2016 are identified. precipitation deficit years are 2000, 2004 - 2006, 2008 and 2015, a correlation between NDVI and precipitation with a lags of zero months is 0.58, with a lags of one month is 0.84, with a lags of two months is 0.85 and With a three month lags it is 0.62. On the other hand, the spatial patterns of the ISV reveal that, in 2000, 95% had severe, moderate and mild drought conditions, and in 2005 it was 93.5%, 2008 87.9%, 2009 78% , 2010, 81.5% and 2016 reached 20.7%. Where values below 40 correspond to severe, moderate and mild drought, and also shows that the years 2000, 2005 and 2008 were years of drought. The indices of the NDVI time series with production, harvested area and yield were evaluated, it has a correlation of 0.84, 0.78 and 0.80 respectively, while the ICV time series shows a correlation of 0.81, 0.72 and 0.80 respectively and The ISV time series, presents a correlation of 0.73, 0.60 and 0.75 respectively.

Keywords: drought, ISS, ICV, ICT, ICP, NDVI, LST y MODIS

ABREVIATURAS

AppEEARS	Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples
AMS	American Meteorological Society
ANA	Autoridad Nacional del Agua
AVHRR	Advanced Very-High-Resolution Radiometer
CLD	Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por Sequía grave o Desertificación, en particular en África.
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ICT	Índice de Condición de Temperatura
ICV	Índice de Condición de Vegetación
IDH	Índice de Desarrollo Humano
INDECI	Instituto Nacional Defensa Civil
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales
IPE	Índice de Precipitación Estandarizado
ISV	Índice de Salud de la Vegetación
LST	Land Surface Temperature
MINAGRI	Ministerio de la Agricultura
MINAM	Ministerio Del Ambiente
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	Near-Infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	Net Primary Production
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONURRD	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
Pa	Precipitación anual
PDC	Provincia de Canchis
PLANGRACC	Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RMSE	Root Mean Square Error
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SMAC	Simplified Method for Atmospheric Corrections
SPEI	Standardized Precipitation - Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
TCI	Temperature Condition Index
TERRA	Es un satélite multinacional de la NASA
TIR	Infrared Thermal
TSM	Temperatura de Superficie del Mar
TSS	Temperatura Superficial del Suelo
USGS	United States Geological Survey
VCi	Vegetation Condition Index
VHI	Vegetation Health Index
VIS	Visible
WGS84	World Geodetic System 84
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification

ÍNDICE

Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Abreviaturas	ix
Índice.....	xi
Lista de tablas	xiii
Lista de figuras.....	xiv
 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Objetivos de la tesis	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
 CAPÍTULO 2: LA SEQUÍA	7
2.1. Definición de sequía	8
2.2. Clasificación de la sequía	9
 CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO	11
3.1. Índices de sequía	11
3.1.1 Índice de condición de vegetación (ICV)	11
3.1.2 Índice de condición de temperatura (ICT)	14
3.1.3 Índice de salud vegetal (ISV).....	17
3.1.4 Índice de precipitación estandarizado (IPE)	18
3.2. Ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico	22
3.2.1 El coeficiente de correlación lineal	22
 CAPÍTULO 4: ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS	24
4.1. Áreas de estudio	24
4.1.1. Clima	25
4.2. Datos utilizados	27
4.2.1. NDVI – MODIS – TERRA	27
4.2.2. TSS – MODIS – TERRA	28
4.3. Datos en campo	28
4.3.1. Datos de precipitación mensual	28
4.3.2. Datos agrícolas.....	29
 CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	30

5.1.	Metodología	30
5.2.	Procesamiento de los productos	30
5.2.1.	Preparación de los productos	32
5.2.2.	Normalización	32
5.2.2.1.	Máximo y mínimo valor de los productos del NDVI y TSS	33
5.2.2.2.	Cálculo de los indicadores de sequía	34
5.3.	Evaluación del índice de salud vegetal (ISV) con el índice de precipitación estandarizado (IPE).....	34
CAPÍTULO 6: RESULTADOS		36
6.1.	Serie de tiempo y análisis de correlación de Pearson del NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco....	36
6.2.	Serie de tiempo del promedio anual del ICV, ICT, NDVI y TSS de la provincia de Canchis de la región Cusco	38
6.3.	Serie de tiempo de la precipitación de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco	38
6.4.	Análisis de los Lags entre el NDVI y la precipitación	40
6.5.	Serie de tiempos de los índices de precipitación estandarizados IPEs	41
6.6.	Patrones del ISV en la provincia de Canchis de la región Cusco	43
6.7.	Serie y evaluación de los índices de sequía con la producción, superficie cosechada y rendimiento de la provincia de Canchis de la región Cusco	44
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES		47
7.1	Conclusiones.....	47
7.2	Recomendación	48
REFERENCIAS		49

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Descripción de las escalas de tiempo del IPE (Mckee et al., 1993).	22
Tabla 3.2	Esquema de clasificación ICV, ICT, IPE y ISV (Du et al., 2013).	22
Tabla 6.1.	Desfase o Lags entre el NDVI y precipitación de la estación meteorológica Sicuani de la región de Cusco.	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Se muestra el ángulo cenit del Sol θ_s , ángulo de visión θ_v , ángulo acimut relativo $\varphi_s - \varphi_v = \Delta\phi$ y la normal de la superficie \vec{n} (Rahman y Dedieu, 1994).	12
Figura 4.1.	a) El área de estudio representado en rojo corresponde a la provincia de Canchis. b) El modelo de elevación digital de la provincia de Canchis. (Elaboración propia) (http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/) Fecha de acceso 12/2015.	24
Figura 4.2.	Zonas de aridez del suelo. (MINAM 2011) (Elaboración propia).	25
Figura 4.3.	AppEEARS [https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/task/area] Fecha de acceso 06/2018.	27
Figura 4.4.	Estaciones meteorológicas del área de estudio. Facilitados por el SENAMHI.	29
Figura 4.5.	Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de la estación meteorológica Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco del periodo 1981 al 2017 (Elaboración propia).	29
Figura 5.1.	Diagrama del cálculo de los índices de sequía y su validación (Adaptado de Du et al., 2013 y Bhuiyan et al., 2006).	31
Figura 5.2	Apilado por mes de la TSS y del NDVI para el área de estudio PC-RC (Elaboración propia).	33
Figura 5.3.	Ejemplo del máximo y mínimo valor de los productos del NDVI y TSS (Elaboración propia).	34
Figura 6.1.	Serie de tiempo del NDVI y temperatura superficial del suelo de la PC-RC.	37
Figura 6.2.	Diagrama de dispersión entre la serie del NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis	37

de la región Cusco.

Figura 6.3.	Serie de tiempo del promedio anual del ICV, ICT, NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco.	38
Figura 6.4.	Serie de tiempo mensual de la precipitación de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.	39
Figura 6.5.	De la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco se presenta; a) Serie de tiempo anual de la precipitación, b) Serie de tiempo anual de los periodos húmedos y c) Serie de tiempo anual de los periodos secos.	40
Figura 6.6.	Caracterización de la sequía.	41
Figura 6.7.	Serie de tiempo mensual del IPE – 3 de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.	42
Figura 6.8.	Serie de tiempo mensual del IPE – 12 de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.	43
Figura 6.9.	Porcentaje de áreas de las condiciones de sequía de la provincia de Canchis de la región Cusco.	44
Figura 6.10.	Serie de producción y superficie cosechada de la provincia de Canchis de la región Cusco.	45
Figura 6.11.	Graficas del análisis de correlación de Pearson de la serie de tiempo anual de la provincia de Canchis de la región Cusco.	46

INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno natural que tiene siempre un impacto en la agricultura, ecología y en los procesos socio – económicos, generando consecuencias graves en el medio ambiente y agudizando los problemas sociales y económicos en todo el mundo. Estudios recientes muestran una disminución en la producción primaria neta a nivel mundial provocada por la sequía (Zhao y Running, 2010). “Los eventos de sequía son una característica recurrente del clima con una amplia gama de impactos en el planeta y la sociedad. Las sequías se encuentran entre las más mortales y las más costosas de todos los desastres naturales” (Bento et al., 2018).

En el Perú según el análisis del plan de gestión de riesgos de desastres (PLANGRACC) se tienen tres niveles en riesgo de sequías: alto, medio y bajo. El 75.25 % representa a los 1301 distritos, del total de los 1729 distritos analizados a nivel nacional: Por ejemplo, el departamento de Cusco, en el escenario agrícola, registra el nivel de riesgo bajo por sequía; y en el escenario pecuario, se registra con un nivel de riesgo alto por sequía (INDECI, 2014).

Asimismo, el índice de salud de la vegetación (ISV) (Kogan, 2001, 1997) es un índice de sequía ampliamente utilizado con valiosa información de teledetección (Bhuiyan et al., 2006; Kogan et al., 2012; Quiring y Ganesh, 2010; Singh et al., 2003). El ISV consiste en una combinación lineal de dos componentes: el índice de condición de vegetación (ICV) que incorpora información de la parte visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético, y el índice de condición térmica (ICT) que se basa en el infrarrojo térmico (TIR). El componente ICV se estima comúnmente utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y tiene como objetivo dar cuenta del estrés hídrico de la vegetación; el ICT, a su vez, se utiliza para evaluar el estrés de la temperatura

en la vegetación y se estima en función de la temperatura de la superficie del suelo (TSS). En adelante denominaremos como el índice de salud de la vegetación (ISV). El fundamento de la formulación de ISV se basa en los siguientes dos supuestos:

- a) El ISV se define de manera tal que cuanto más bajo es el NDVI y más alto el TSS, más pobre es la salud de la vegetación;
- b) Como no existe un conocimiento a priori sobre la contribución de la vegetación y la temperatura a la salud de la vegetación, este último índice se suele calcular simplemente promediando el ICV y el ICT.

En el presente trabajo, se identificó los patrones de sequía del ISV generados a partir del NDVI y TSS, donde la sequía severa, moderada y leve corresponde a los valores menores de 40. Se eligió el ISV, ya que este índice permite la cuantificación de la salud de la vegetación en condiciones térmicas. Además, el ISV, ICV e NDVI se correlacionan con la producción, en la superficie cosechada y el rendimiento de la provincia de Canchis de la región Cusco, a fin de comprender la respuesta de la vegetación a los eventos de sequía. A partir de los datos de campo de la precipitación mensual de la estación meteorológica Sicuani del SENAMHI se hizo la serie histórica del índice de precipitación estandarizada (IPE) a corto y largo plazo, ya que el IPE integra la demanda de agua, obtenida a través de la precipitación. En adelante denominaremos al área de estudio provincia de Canchis de la región Cusco (PC-RC)

1.1 Antecedentes

El SENAMHI en el 2016, “estimó el riesgo de sequías, en base al peligro y la vulnerabilidad de sequías en el sur del Perú. Para ello se utilizó la base de datos de precipitación, PISCOV1.1 y también información especializada sobre elementos físicos, ambientales y socioeconómicos” (SENAMHI, 2016). El índice de peligro de sequías (DHI), estimaron en base al análisis bivariado de la duración y la severidad de las sequías, estimadas con la base PISCO y para determinar los factores de vulnerabilidad está relacionado a la elevación, pendiente, uso de suelo, textura de suelo, disponibilidad de represas de agua, distancia a ríos, densidad poblacional e índice de desarrollo humano (IDH). “Para la región sur del Perú, se obtuvieron mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo

de los cuales 24 distritos se determinaron con riesgo de **sequías muy alto** y 210 con riesgo de **sequías alto** entre ellos está el departamento de **Cusco**” (SENAMHI, 2016).

El investigador Bento en el año 2018, evaluó las climatologías de NDVI y TSS, que abarcan el período comprendido entre los años 1982 y 2009. Para ello usó el ICV, ICT y ISV en la geografía del Mediterráneo, que luego se correlacionan con el indicador de sequía multiescalar que es el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI) con el objetivo de evaluar el efecto de la sequía en cada contribución. Los resultados de las correlaciones entre ICV-SPEI y ICT-SPEI muestran que las contribuciones relativas de ICV y ICT a la salud de la vegetación dependen de la cobertura vegetal: el efecto de la sequía es más evidente en el caso de ICV en las clases de clima semiárido (regiones donde el límite factor al crecimiento de la vegetación es el agua); mientras que el efecto de la sequía es más evidente en el ICT para las clases de clima más húmedo (regiones donde el factor limitante es la radiación solar). Es decir, según Bento et al., (2018) se puede concluir también que al maximizar las correlaciones entre ISV y SPEI, durante un período climatológico, es posible evaluar los roles relativos de ICV y ICT a ISV para diferentes regiones climáticas.

En la investigación de Rivera (2014) en Argentina, partiendo de una regionalización en la serie de tiempo de los eventos El Niño/La Niña, para la ocurrencia de sequías propuso comparar los diversos índices de sequía de la variabilidad espacio-temporal de la sequía meteorológica en el sur de Sudamérica en el período 1961-2008. Finalmente se analizó en la región de estudio futuros cambios en las características de las sequías y aplicaciones para el sector agrícola y de recursos hídricos. (Rivera J., 2014).

Anculle en el 2016, “desarrollo un modelo de estudio del inicio de la sequía en la costa norte de Perú, en el cual se determinó una correlación de 0.84 entre el valor anual máximo de NDVI-VEGETATION en Pomalca y la producción de caña de azúcar en Lambayeque en el periodo 1998-2012.” (Anculle T, 2016). Anculle concluyó que un buen indicador de la sequía agrícola es el NDVI para la costa norte de Perú. Para el diseño del modelo de inicio de sequía, empleo la técnica de regresión lineal múltiple y obtuvo una ecuación que relaciona el NDVI, TSM, IOS y la precipitación (Anculle T, 2016).

También a nivel mundial, existen estudios relevantes para el desarrollo de diferentes índices de sequía, durante las últimas décadas con el objetivo de caracterizar los diferentes tipos de sequía, a saber, sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas (Mishra y Singh, 2010; Zargar et al., 2011). Los índices de amplio uso se obtienen a partir de datos de las estaciones meteorológicas; el standardized precipitation index (SPI) (McKee et al., 1993) y palmer drought severity index (PDSI) (Palmer, 1965). El SPI tiene varias características nuevas con respecto a los índices anteriores, incluyendo su simplicidad y flexibilidad temporal. Esto permite que su aplicación para la vigilancia de la sequía sea en toda escala de tiempo (Guttman, 1999), lo que facilita su aceptación por parte de la comunidad científica y tomadores de decisiones (Hayes et al., 1999). Du et al., 2013 Utilizaron el SPI para examinar la sequía grave en las llanuras del sur y en el suroeste de los Estados Unidos y los resultados mostraron que el SPI es útil para detectar el inicio de la sequía y el seguimiento de su evolución, asimismo, el SPI ha sido empleado para vigilar la sequía meteorológica en África y otras regiones. Sin embargo, una de las desventajas del SPI es su obtención a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, lo que exige el empleo de técnicas de interpolación espacial, como el inverso de la distancia ponderada y el modelo Kriging ordinario, para el estudio espacial de la sequía (Brown et al., 2008; Du et al., 2013). Asimismo, la temperatura de la superficie terrestre (TSS) y el índice de condición de temperatura (ICT) (Kogan, 1995; Unganai y Kogan, 1998) este índice para un evento de sequía se reducirá la humedad del suelo a causa del estrés térmico. El ICV ha demostrado ser de utilidad para la vigilancia de impacto de la sequía sobre la vegetación a gran escala y este índice con el rendimiento de los cultivos tiene una fuerte correlación en la sequía agrícola el ICV (Liu y Kogan, 1996; Unganai y Kogan, 1998; Kogan et al., 2005; Du et al., 2013). Un estudio realizado en una región semi-árida de la Península Ibérica también encontró que la interpretación del ICV era más complicada que otros índices de sequía, ya que proporciona una condición de la medida indirecta de la humedad (Vicente-Serrano, 2007).

1.2 Planteamiento del problema

En la provincia de Canchis los impactos de la sequía, durante los años 2005, 2008, 2010 y 2016, presentó pérdida en la producción agrícola según la serie histórica del ministerio de agricultura (MINAGRI), durante el año 2008, 2011 y 2015 la provincia de Canchis, fue afectada por la sequía, lo que ocasionó una reducción de las superficies cosechadas, es decir, se vio influenciada en la producción de los años indicado en todos los cultivos (MINAGRI., 2018).

Por lo expuesto es necesario plantear unos patrones del ISV para analizar los índices de sequía a partir de los datos físicos que permitan vigilar el inicio, duración y final de la sequía, los cuales son evaluados con los datos de producción, superficie cosecha y rendimiento de todos los cultivos, de la provincia de Canchis – Departamento de Cusco - Perú durante el periodo 2000 - 2017.

Por esta razón, es necesario analizar mediante los datos de imágenes satelitales la distribución espacial y la evolución temporal del ICV, ICT y el índice de salud vegetal (ISV) usando datos NDVI/MODIS y TSS/MODIS.

Es decir siendo necesario generar el índice de salud vegetal (ISV) como un indicador en la concurrencia de eventos de sequía en la provincia de Canchis durante el periodo 2000 – 2017 surge las siguientes preguntas:

¿De qué manera los patrones del índice de sequía (ISV), generados mediante los datos de imágenes satelitales NDVI y TSS del sensor MODIS, identificarán los niveles de riesgo de la sequía en la PC-RC - Perú durante el periodo 2000 – 2017?

¿Cuál de los índices de sequía ICV e ICT analizará mejor la evolución temporal en los niveles de riesgo de la sequía, en la PC-RC - Perú?

¿Cómo el índice de salud vegetal (ISV), generado mediante un modelo estadístico de ponderación, al caracterizar la salud de la vegetación a partir del ICV e ICT considerando las contribuciones relativas del NDVI y TSS en la PC-RC - Perú durante el periodo 2000 – 2017?

¿Cuál de los índices ISV, ICV y NDVI usando la correlación lineal de Pearson con la producción, superficie cosechada y rendimiento evalúa mejor la sequía?

1.3 Objetivos de la tesis

1.3.1. Objetivo general

- Identificar los patrones del ISV generados mediante los datos de imágenes satelitales NDVI y TSS durante el periodo 2000 – 2017, para la PC-RC – Perú.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la evolución temporal del ICV e ICT para los eventos de sequía usando los productos (NDVI y TSS) /MODIS, en la PC-RC - Perú durante el periodo 2000 – 2017.
- Generar el ISV, como indicador en la concurrencia de eventos de sequía, mediante un modelo estadístico basado en la ponderación del ICV e ICT, en la PC-RC - Perú durante el periodo 2000 – 2017.
- Evaluar el ISV, el ICV y el NDVI con la producción, superficie cosechada y rendimiento mediante una correlación lineal de Pearson, para el estudio de eventos de sequía, en la PC-RC - Perú durante el periodo 2000 – 2017.

LA SEQUÍA

La sequía es uno de los eventos meteorológicos extremos, posee la mayor duración y la menor predictibilidad, debido a la dificultad para definir su comienzo y fin, su desarrollo es lento en las múltiples facetas que posee a nivel regional (Mishra y Singh, 2010).

Según Wilhite y Svoboda (2000) el fenómeno de sequía ocurre en cualquier época del año ya sea en regiones húmedas como secas y cuando el período es prolongado, se observa que la precipitación se encuentra por debajo de sus valores normales (White y Walcott, 2009).

Es importante considerar que la precipitación es el factor principal que controla la formación y persistencia de condiciones de sequía (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

También Rivera (2014) en su tesis, “Aspectos climatológicos de las sequias meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras” afirma lo siguiente:

“Las características y épocas de las precipitaciones, incluyendo la distribución de los días lluviosos durante las etapas fenológicas de crecimiento de los cultivos, la intensidad y duración, su inicio y fin juegan un papel significativo en la ocurrencia de sequías, por lo tanto, cada año de sequía es único en cuanto a sus características climáticas y sus impactos. No obstante, otras variables como la temperatura, el viento, la humedad del aire, la evapotranspiración, la cobertura nubosa y una mayor insolación pueden reforzar la escasez de agua, agravando la severidad de las sequías. Los impactos de las sequías se evidencian a nivel ambiental, a través de la aceleración de los procesos de desertificación, generando incrementos en el riesgo de incendios, afectando los hábitats naturales, los ecosistemas y limitando la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico e industrial. Las sequías también afectan la calidad del agua, dado que fluctuaciones climáticas moderadas alteran los regímenes hidrológicos que poseen efectos sustanciales en la química de los reservorios (Webster *et al.*, 1996)” (Rivera, 2014, p. 13 - 14).

2.1 Definición de sequía

La sequía es un período de déficit en las precipitaciones durante un tiempo relativamente prolongado con impacto en la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas naturales. La sequía se diferencia de otros peligros naturales porque siempre tiene un inicio lento y es difícil de observar y predecir con exactitud (Beguería y otros., 2010). Sin embargo, “se debe tener un conocimiento más minucioso sobre las variables climáticas y disponer de una base de datos a diferente escala, según el nivel de detalle deseado tales como horario, diario, mensual, estacional” (García., 2008).

Por otra parte, según Heim, (2002) la Sociedad Meteorológica Americana considera cuatro categorías de sequía: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Heim, 2002). Al respecto algunas de las definiciones comúnmente más utilizadas son las siguientes:

- a) La Organización Meteorológica Mundial define sequía como “una deficiencia prolongada y extendida en la precipitación.” (OMM, 1990).
- b) La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Sequía y la Desertificación define la sequía como “el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de la tierra.” (Secretaría General de las Naciones Unidas, 1994).
- c) La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas define “un peligro de sequía como el porcentaje de años, cuando los cultivos se pierden por la falta de la humedad” (FAO, 1983).
- d) La enciclopedia del clima define la sequía “como un período prolongado - una temporada, un año o varios años - de deficientes precipitaciones con respecto a la estadística multianual media para una región” (Allaby, 2007).
- e) Gumbel (1963) define sequía “como el valor anual más pequeña de caudal diario”.
- f) Palmer (1965) describió sequía “como una desviación significativa de las condiciones hidrológicas normales de un área”.
- g) Linsley et al. (1958) define sequía “como un período sostenido de tiempo sin precipitación significativa”.

h) La RAE, 2015, define “Tiempo seco de larga duración.”

Sin embargo, dependiendo de la variable utilizada para describirla, varía la definición de sequía. Por lo tanto, las definiciones de sequía se pueden clasificar en diferentes categorías que se discuten a continuación.

2.2 Clasificación de la sequia

La sequía se clasifica generalmente en cuatro categorías (Wilhite y Glantz, 1985; AMS, 2004), y estas son:

1. **Sequía meteorológica:** Se define deficit precipitación sobre una región durante un largo período de tiempo. Las precipitaciones han sido de uso común para el análisis de la sequía meteorológica (Pinkayan, 1966; Santos, 1983; Chang, 1991; Eltahir, 1992). Teniendo en cuenta la sequía como déficit de precipitación con respecto a los valores medios, varios estudios han usado datos de precipitación mensual para analizar la sequía (Gibbs, 1975). También analizan la duración y la intensidad de la sequía en relación a la escasez de precipitaciones acumuladas otros enfoques (Chang y Kleopa, 1991; Estrela et al., 2000).
2. **Sequía hidrológica:** Es la insuficiencia de los recursos hídricos superficiales y subsuperficiales de los usos del agua establecidos de un sistema de gestión de los recursos hídricos dado. Para el análisis de la sequía hidrológica se han aplicado ampliamente datos de caudal (Dracup et al., 1980; Zelenhasic y Salvai, 1987; Chang y Stenson, 1990; Frick et al., 1990; Mohan y Rangacharya, 1991; Clausen y Pearson, 1995). A partir del análisis de regresión se relaciona la sequía en el caudal con las propiedades de captación, se encuentra que la geología es uno de los principales factores que influyen en las sequías hidrológicas (Zecharias y Brutsaert, 1988; Vogel y Kroll, 1992).
3. **Sequía agrícola:** “Se refiere a un período que se caracteriza por la disminución de la humedad del suelo; depende de varios factores que afectan a las sequías meteorológicas e hidrológicas, junto con las diferencias entre la evapotranspiración real y evapotranspiración potencial lo que implica que la demanda de agua de las plantas depende de las condiciones climáticas prevalecientes de las características

biológicas de una planta específica y de su etapa de crecimiento, así como también de las propiedades físicas y biológicas del suelo. Finalmente se observa que varios índices de sequía, basados en una combinación de precipitación, temperatura y humedad del suelo, se han derivado para estudiar las sequías agrícolas” (Mishra y Singh, 2009).

4. ***Sequía socioeconómica:*** Este tipo de sequía se asocia con el fracaso de los sistemas de recursos hídricos para satisfacer las demandas de agua y por lo tanto el bien económico (agua) se asocia a la sequía con la oferta y la demanda (AMS, 2004). La sequía socioeconómica ocurre como resultado de un déficit relacionado con el clima en el suministro de agua, cuando la demanda de un bien económico es superior a la oferta (Mishra y Singh, 2009).

FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Índices de sequía

En este estudio se considera los siguientes índices de sequía: El índice de condición de vegetación (ICV); el índice de condición de temperatura (ICT); el índice de salud vegetal (ISV) y el índice de precipitación estandarizada (IPE) describiremos a continuación.

3.1.1 Índice de condición de vegetación (ICV)

Para el cálculo del ICV es necesario conocer los fundamentos teóricos del NDVI. El producto NDVI del MODIS/Terra se genera, suponiendo que la superficie de la Tierra es uniforme de reflectancia lambertiana y la atmósfera es uniforme horizontalmente. La reflectancia TOA (ρ_{TOA}), es decir, reflectancia en el tope de la atmósfera es calculada según la ecuación (3.1),

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L d^2}{\mu_s E_s}, \quad (3.1)$$

donde L es la radiancia media en unidades $Wm^{-2}sr^{-1}$ que llega al sensor, E_s es el flujo solar en la parte superior de la atmósfera en unidades Wm^{-2} , $\mu_s = \cos(\theta_s)$, y θ_s es el ángulo cenit del Sol y $\pi = 0.14159$

Por lo tanto el espesor óptico de la atmósfera será denotado por τ , la dirección de visión será denotada por el ángulo cenit θ_v y el acimut φ_v , y los ángulos cenit y acimut del Sol por θ_s y φ_s , respectivamente (Figura 3.1.). El término ρ_c será denotado como la reflectancia del objetivo. Los problemas de absorción no se tendrán en cuenta en esta parte.

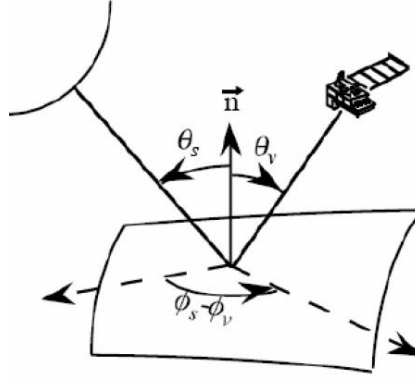


Figura 3.1. Se muestra el ángulo cenit del Sol θ_s , ángulo de visión θ_v , ángulo acimut relativo $\phi_s - \phi_v = \Delta\phi$ y la normal de la superficie \vec{n} (Rahman y Dedieu, 1994).

El algoritmo del método simplificado para correcciones atmosféricas (SMAC) (*Simplified Method for Atmospheric Corrections*), propuesto por Rahman y Dedieu en el año 1994, es un método semiempírico y se basa en la teoría de transferencia radiativa que considera el efecto de *scattering* y absorción de los aerosoles de tal modo que las moléculas de los gases se encuentra en la atmósfera, y que la energía radiante atenúa o aumenta (en el caso de scattering múltiple) respecto a los coeficientes utilizados en este modelo, tales como la transmitancia de cada tipo de gas, el espesor óptico, el albedo esférico de la Tierra, etc. El modelo SMAC estima la reflectancia de un objeto en la superficie de la Tierra a partir de la reflectancia TOA (Rahman y Dedieu, 1994). Para una superficie lambertiana uniforme, el modelo SMAC utiliza la ecuación (3.2) para la estimación de la reflectancia de un objeto (ρ_c) en la superficie de la Tierra (Rahman y Dedieu, 1994):

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_c}{1 - \rho_c S} \right\}, \quad (3.2)$$

donde $T(\theta_s) = e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s)$; $T(\theta_v) = e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + t_d(\theta_v)$;

ρ_{TOA} es la reflectancia TOA, es decir, la cantidad total de radiación recibida por el satélite; t_g es la transmitancia total (hacia arriba y abajo) de las moléculas de los gases que se encuentran en la atmósfera, teniendo en cuenta la absorción atmosférica;

ρ_a es la reflectancia atmosférica, la misma que está en función de los aerosoles, de las propiedades ópticas, del ángulo de iluminación, del ángulo de visión y acimut relativo entre el Sol y el observador;

ρ_c que es la reflectancia del cuerpo u objeto en la superficie de la Tierra;

S es el albedo atmosférico de la atmósfera;

$T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$ representa la transmitancia total (difusa + directa) de los gases atmosféricos considerados con una distribución constante, como el nitrógeno y argón, hacia abajo y hacia arriba respectivamente;

τ es el espesor óptico atmosférico ($e^{\frac{-\tau}{\mu_s}}$ y $e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}$ siendo las transmitancias atmosféricas directas;

$t_d(\theta_s)$ y $t_d(\theta_v)$ son la transmitancia difusa atmosférica;

$\mu_s = \cos(\theta_s)$ es el coseno del ángulo cenit del Sol;

$\mu_v = \cos(\theta_v)$ es el coseno del ángulo cenit de visión;

$\Delta\phi$ es el ángulo acimut relativo entre la dirección del Sol y satélite (Rahman y Dedieu, 1994). A partir de la ecuación (3.2) despejamos la reflectancia del cuerpo sobre la superficie y obtenemos la siguiente ecuación (3.3)

$$\rho_c = \frac{\rho_{TOA} - \rho_a t_g}{t_g T_{\theta_s} T_{\theta_v} + (\rho_{TOA} - \rho_a t_g) S} \quad (3.3)$$

En la presente tesis se utilizó el índice más difundido e históricamente utilizado que es el NDVI, propuesto por (Rouse, 1974), cuya fórmula se muestra en la ecuación (3.4):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}, \quad (3.4)$$

donde, ρ_{NIR} y ρ_R representan las reflectancias del objeto en la superficie del suelo del canal que corresponde a la región del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente. La ecuación (3.4) es una fórmula semiempírica (Jackson y Huete, 1991).

Ésta fórmulas son de gran trascendencia para un mejor estudio del estado de la salud de la vegetación.

Para las regiones con vegetación, el clima relacionado con los cambios del NDVI, que relacionan los impactos de la sequía sobre la vegetación y el ecosistema no pueden ser fácilmente detectados directamente a partir del NDVI (Du et al., 2013). Por ello, Kogan (1995b) para controlar las diferencias locales en la productividad de los ecosistemas desarrolló “el índice de condición de la vegetación (ICV) y considera que este índice es una normalización basada en píxeles del NDVI y el ICV es un índice para la vigilancia de la

sequía cuando la vegetación es vigorosa, es decir cuando $NDVI \approx 1$. Por otro lado, el NDVI se ve afectado por la variación climática” (Du et al., 2013). En una determinada región, clima y estación del año, la sequía debilita extremadamente el crecimiento de la vegetación y da lugar a un $NDVI \approx 0$ en las observaciones de varios años. Cuando un $NDVI \approx 1$, esto representa una condición climática óptima (Du et al., 2013). Por esta razón el ICV es un mejor indicador del estrés hídrico de la vegetación de NDVI (Du et al., 2013) y se define mediante la siguiente fórmula (3.5):

$$ICV = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 . \quad (3.5)$$

En la aplicación de la formula (3.5) en el presente estudio los valores de los píxeles del NDVI son suavizadas con el filtro Savitzky - Golay (Chen et al., 2004). “Los valores de $NDVI_{max}$ y $NDVI_{min}$ son, respectivamente, el máximo valor del NDVI y el mínimo valor del NDVI. Como resultados de los cálculos realizados se observa que el ICV varía de 0 a 100, lo que corresponde a los cambios en la condición de la vegetación de extremadamente desfavorable a óptima. Para el caso de un mes extremadamente seco, es decir cuando el estado de la vegetación es escaso se tiene que el $ICV \approx 0$. Ser debe considerar que la vegetación refleja un estado adecuado cuando el $ICV \geq 50$. Sin embargo, en condiciones óptimas de la vegetación, el $ICV \approx 100$, lo cual se puede ver en la Tabla 3.2. (Jain et al., 2009).” (Carbajal, 2018, p 85).

3.1.2 Índice de condición de temperatura (ICT)

Para el cálculo del índice de condición de temperatura (ICT) es conveniente comprender y conocer lo siguiente:

El producto MOD11A2 del MODIS/Terra brinda información de temperatura superficial del suelo, la señal infrarroja térmica captada por el sensor del satélite es determinada por la temperatura de la superficie observada, la emisividad y reflectividad de la superficie, la emisión, absorción, scattering atmosférico y la radiación solar. Hay evidencia de que las emisividades de las distintas coberturas terrestres son relativamente estables en el rango

espectral de $10.5\mu m - 12.5\mu m$, donde se localizan las bandas 31 y 32 de MODIS (Wan y Dozier, 1996).

Conociendo las emisividades de las distintas coberturas de la superficie, se puede generalizar un algoritmo multicanal corrigiendo los efectos atmosféricos bajo condiciones desconocidas de la atmósfera (Wan y Dozier, 1996). Para obtener las estimaciones de TSS a nivel de píxel con este método, fundamentalmente se debe al algoritmo de *split-window*, con conocimiento previo sobre las emisividades de la superficie observada (Wan, 1999). La forma numérica generalizada de la ecuación *split-window* es de tipo lineal y tiene en cuenta básicamente las temperaturas de brillo y las emisividades en las bandas 31 y 32 del MODIS. La ecuación generalizada de *split-window* es la siguiente:

$$T_{SS} = \left(A_1 + A_2 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{(T_{31} + T_{32})}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{31} - T_{32}) + C, \quad (3.6)$$

donde ε es la emisividad ($\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$), $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de emisividad entre la banda 31 y 32 ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$) y T_{31} y T_{32} la temperatura de brillo en las bandas 31 y 32, respectivamente. Los parámetros A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 y C son propios de la ecuación *split-window* ajustada (Wan y Dozier, 1996).

Los coeficientes óptimos de la ecuación se obtienen de la siguiente manera:

- 1) Se divide en dos grupos la temperatura del aire cercano a la superficie de acuerdo a, así en el primer grupo se incluyen atmósferas de invierno ($T_{aire} \leq 280K$) y en el segundo grupo, atmósferas de verano cálidas ($T_{aire} > 280K$);
- 2) son separadas las columnas de vapor de agua atmosférico en intervalos de 0.5 cm;
- 3) es separada en 2 grupos la condición de la temperatura de superficie según el primer grupo representa la condición de noche $T_{aire} - 16K \leq T_{ss} \leq T_{aire} + 4K$ y el segundo grupo la condición de día $T_{aire} - 4K \leq T_{ss} \leq T_{aire} + 16K$;
- 4) las emisividades son especificadas por $0.89 \leq \varepsilon \leq 1$ en pasos de 0.01 y $-0.025 \leq \Delta\varepsilon \leq 0.015$ en pasos de 0.005;
- 5) son seleccionados 9 ángulos de visión para cubrir todo el rango de visión desde el nadir a 65.5° .

“Los coeficientes en los algoritmos serán determinados por análisis de regresión separada de los datos simulados en cada grupo de temperatura de superficie, en cada intervalo de vapor de agua de cada columna a esos 9 ángulos de visión. La columna total de vapor de agua y la temperatura del aire se obtienen de los productos MODIS de perfiles atmosféricos” (Wan, 1999). En análisis del error integral se ha hecho en amplio rango de condiciones atmosféricas y de superficie. La precisión del algoritmo generalizado *Split-window* es mejor que 1 K para los tipos de cobertura del suelo, de emisividad conocida (Wan, 1999).

A medida que la superficie es afectada por la sequía, ésta se encuentra con un estrés térmico. Por lo tanto, el índice de condición de temperatura (ICT) se propone como un indicador basado en el estrés térmico para determinar la sequía, ya que es un fenómeno relacionado con la temperatura (Kogan, 1995a). Este índice asume que para un evento de sequía se reducirá la humedad del suelo a causa del estrés térmico, ya que existe mayor temperatura superficial del suelo (TSS) en el año de sequía que en los años normales. El algoritmo del ICT es similar al ICV y sus condiciones se estimaron con relación a la temperatura máxima/mínima para una serie de tiempo dada.

Frente al NDVI cuando la TSS es alta el crecimiento de la vegetación indica condiciones desfavorables o de sequía y cuando la TSS es baja indica condiciones muy favorables (Singh et al., 2003). Por lo tanto, la ecuación del ICT se modificó como la siguiente expresión (3.7):

$$ICT = \frac{TSS_{max} - TSS}{TSS_{max} - TSS_{min}} * 100 , \quad (3.7)$$

donde TSS, TSS_{max} y TSS_{min} son los valores de TSS, el máximo valor de la TSS y el mínimo valor de la TSS de cada píxel para el mismo mes, respectivamente, durante el período de estudio de 2000 a 2017. A medida que el ICT es evaluado en un proceso de sequía, sus valores son cercanos o iguales a 0, en cambio el ICV en condiciones de humedad, el ICT es evaluado cercano a 100, lo que se muestra en la Tabla 3.2. (Du et al., 2013).

3.1.3 Índice de salud vegetal (ISV)

“El índice de salud de la vegetación (VHI) (Kogan, 2001, 1997) es un índice de sequía ampliamente utilizado basado en información de teledetección” (Bhuiyan et al., 2006; Kogan et al., 2012; Quiring y Ganesh, 2010; Singh et al., 2003). El fundamento de la formulación de ISV se basa en los siguientes dos supuestos:

- a) El ISV se define de manera tal que cuanto más bajo es el NDVI y más alto el TSS, más pobre es la salud de la vegetación;
- b) Como no existe un conocimiento a priori sobre la contribución de la vegetación y la temperatura a la salud de la vegetación, este último índice se suele calcular simplemente promediando el ICV y el ICT.

El primer supuesto se verificó en varios estudios que se centraban en las regiones ubicadas en Mongolia y los Estados Unidos (Karnieli et al., 2010, 2006; Sun y Kafatos, 2007). Los resultados indican que la forma en que TSS y NDVI contribuyen a la salud de la vegetación depende de la ubicación, la estación y el tipo de vegetación. Por ejemplo, se encontró una contribución concurrente de ambas variables cuando el factor limitante para el desarrollo de la vegetación es la energía solar (generalmente en latitudes altas y elevaciones), mientras que las contribuciones opuestas ocurren cuando el agua es el factor limitante (típicamente en regiones áridas y semiáridas). El Índice de Salud de la Vegetación (ISV) está dado por:

$$ISV = \alpha ICV + (1 - \alpha) ICT, \quad (3.8)$$

donde α es un parámetro de ponderación que generalmente se establece como $\alpha = 0.5$ (Kogan, 1997, 2001). También “el ISV también varía de 0 a 100, y ello corresponde a los cambios en la salud de la vegetación entre muy adverso a muy favorable” (Du et al., 2013). En caso de una sequía agrícola, la salud de la vegetación muy pobre, por lo que tiene un valor cercano o igual a 0; y en condiciones de una vegetación saludable, el ISV tiene un valor cercano a 100, lo que se muestra en la Tabla 3.2. (Du et al., 2013, Bhuiyan et al., 2006 y Kogan et al., 2001).

3.1.4 Índice de precipitación estandarizado (IPE)

McKee et al. (1993, 1995) propusieron el IPE. Este índice, en la presente tesis será denominada Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) para evaluar la precipitación irregular. Los datos de precipitación mensual son tomados de *Ground Water Department*, Jodhpur, Rajasthan. Dado que los datos de precipitación están sesgados en su mayoría, con el fin de calcular IPE, los datos de precipitación son normalizados usando la función gamma (ecuación 3.10.). El IPE se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo deseado e invariante espacialmente (Guttman, 1998, 1999). Para el cálculo del IPE, para un lugar determinado, se parte de la serie histórica de la precipitación mensual de una estación meteorológica correspondiente al periodo requerido. En este caso “la distribución Gamma que se define de acuerdo a su función de densidad de probabilidad como se muestra en la expresión” (3.9) (Edwards y McKee, 1997):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad \text{para } x > 0, \quad (3.9)$$

dónde:

- $\alpha > 0$: es el parámetro de forma,
- $\beta > 0$: es el parámetro de escala,
- $x > 0$: es la cantidad de precipitación,
- $\Gamma(\alpha)$: es la función Gamma y
- $g(x) = 0$, para $x < 0$.

La función Gamma es definida por la integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy. \quad (3.10)$$

En general, la función Gamma se evalúa numéricamente o utilizando los valores tabulados en función del valor tomado por el parámetro α (Thom, 1958).

Para modelar los datos observados con una función de densidad de distribución gamma es necesario estimar adecuadamente los parámetros α y β (Thom, 1958). Diferentes métodos han sido sugeridos en la literatura para la estimación de estos parámetros, por ejemplo, en

Edwards & McKee (1997) sugieren la estimación de estos parámetros utilizando la aproximación de Thom (1958) para una máxima probabilidad como sigue:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad (3.11)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}, \quad (3.12)$$

donde \bar{x} representa el promedio de la precipitación y n es el número de observaciones

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}. \quad (3.13)$$

La estimación de los parámetros se puede mejorar aún más mediante el uso del enfoque interactivo sugerido en Wilks (2011).

Para maximizar la ecuación (3.9), es más simple tomar logaritmos antes de diferenciar y poner a cero (Thom, 1958). Esto da:

$$L = -n\hat{\alpha} \log \hat{\beta} - n \log \Gamma(\hat{\alpha}) + (\hat{\alpha} - 1) \sum \log x - \frac{1}{\hat{\beta}} \sum x$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha}^2} & \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha} \delta \hat{\beta}} \\ \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\alpha} \delta \hat{\beta}} & \frac{\delta^2 L}{\delta \hat{\beta}^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \hat{\alpha}} \\ \frac{\partial L}{\partial \hat{\beta}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -n\Gamma''(\hat{\alpha}) & \frac{-n}{\hat{\beta}} \\ \frac{-n}{\hat{\beta}} & \frac{n\hat{\alpha}}{\hat{\beta}^2} - \frac{2\sum x}{\hat{\beta}^3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum \ln(x) - n\ln(\hat{\beta}) - n\Gamma'(\hat{\alpha}) \\ \frac{\sum x}{\hat{\beta}^2} - \frac{n\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

donde α^* y β^* son generalmente mejores estimaciones de α y β que $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$. El proceso se repite hasta que el algoritmo converge. Si no se detecta la convergencia se utilizan las estimaciones de Thom (1958) para α y β y se utilizan todos los datos disponibles para adaptarse a estos parámetros (Wilks, 2011).

Después de estimar los coeficientes α y β de la función de densidad de probabilidad $g(x)$ se integra con respecto a x y se obtiene una expresión de probabilidad acumulada $G(x)$ en una cierta cantidad de precipitación observada para un mes dado y una específica escala de tiempo (Giuseppe R. et al., 2007).

$$G(x) = \int_0^x g(x') dx', \quad (3.15)$$

reemplazando (3.9) en (3.15) se obtiene:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{\frac{-x}{\beta}} dx, \quad (3.16)$$

dando la forma a la expresión $\frac{x}{\beta}$. Es decir, tenemos ahora:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{-1} e^{\frac{-x}{\beta}} \frac{dx}{\beta}, \quad (3.17)$$

denotando $t = \frac{x}{\beta}$ esta ecuación se convierte en la función gamma incompleta

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt. \quad (3.18)$$

La función Gamma no está definido para $x = 0$ ya que no puede haber precipitación, entonces la probabilidad acumulada se convierte en:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x), \quad (3.19)$$

donde q es la probabilidad sin precipitación. La probabilidad acumulada se transforma entonces en una distribución normal con media a cero y una desviación estandar igual a uno y se obtiene el índice IPE (Edwards y McKee, 1997 y Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

El enfoque anterior, sin embargo, no es ni práctico ni numéricamente fácil de usar si hay muchos puntos de la rejilla o muchas estaciones en que para calcular el índice IPE. En este caso, un método alternativo se describe en Edwards y McKee (1997) utilizando la técnica de conversión aproximada desarrollada en Abramowitz y Stegun (1965) que convierte la probabilidad acumulada en una variable estándar Z . El índice IPE se define entonces como:

$$Z = IPE = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5, \quad (3.20)$$

$$Z = IPE = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0.5 < H(x) < 1, \quad (3.21)$$

donde

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0.5, \quad (3.22)$$

y

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1, \quad (3.23)$$

donde x es la precipitación, $H(x)$ es la probabilidad acumulada de precipitación observada y $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ son constantes con los siguientes valores según lo expresan Lloyd-Hughes y Saunders (2002):

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517; \quad c_1 = 0.802853; \quad c_2 = 0.010328, \\ d_1 &= 1.432788; \quad d_2 = 0.189269; \quad d_3 = 0.001308. \end{aligned}$$

Sin embargo, existen otros tipos de distribución estadística, en algunos casos, para proporcionar un mejor modelo de precipitación para algunas estaciones o para escalas de tiempo particulares, tales como, por ejemplo, la distribución de Poisson-gamma o la distribución logarítmica normal. Si el valor del parámetro α es muy alto, la distribución gamma tiende hacia una distribución normal y, por lo tanto, puede ser más eficaz, a nivel computacional, para estimar el índice IPE utilizando una distribución normal donde X_{ij} es la precipitación de la estación de observación del pluviómetro i en una serie histórica de j años esto significa que \bar{X}_i es la media estacional de la serie histórica y σ_i es la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Entonces, el índice IPE es definido por la diferencia entre la precipitación total mensual histórica y su media estacional a largo plazo entre la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Por lo tanto:

$$IPE = \frac{(X_{ij} - \bar{X}_i)}{\sigma_i}, \quad (3.23)$$

dónde:

X_{ij} : Precipitación de la estación observada y observación histórica,

\bar{X}_i : Precipitación media de la estación observada y

σ_i : Desviación estándar de la estación observada.

Finalmente debe remarcar que el IPE representa el número de desviaciones estándar en que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico (Galván, 2011). El cálculo

en varias escalas de tiempo se muestra en la Tabla 3.1. (McKee et al, 1993). También cinco clases de IPE se muestran en la Tabla 3.2.

IPE	Descripción
IPE-1	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 1 mes
IPE-3	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses
IPE-6	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 6 meses
IPE-9	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 9 meses
IPE-12	El índice de precipitación estandarizada a una escala de 12 meses

Tabla 3.1. Descripción de las escalas de tiempo del IPE (McKee et al, 1993).





















Esquema de Clasificación	ICV	ICT	IPE	ISV
Clases De Sequia				
Sequía Extrema	<10 	<10 	<-2.0 	<20 
Sequía Severa	<20 	<20 	<-1.5 	<30 
Sequía Moderada	<30 	<30 	<-1.0 	<40 
Sequía Leve	<40 	<40 	<-0.5 	<50 
No hay Sequia	>40 	>40 	>0.0 	>50 

Tabla 3.2. Esquema de clasificación ICV, ICT, IPE y ISV (Du et al., 2013).

3.2 Ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico

Para analizar de los resultados se usó el coeficiente de Pearson (Wilks 2011).

3.2.1 El coeficiente de correlación lineal de Pearson

En 2011 Wilks define al coeficiente de correlación lineal de Pearson que está dado por la razón de la covariancia existente entre las dos variables y el producto de sus desviaciones estándar (3.35)

$$r_{xy} = \frac{COV(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} \right\}} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right\}^{1/2}} \quad (3.35)$$

El coeficiente de correlación lineal toma valores entre -1 y +1 y su interpretación y categoría fueron dados por Wilks (2011) y Taylor (1990) en el sentido siguiente:

- Primero “si Y tiende a aumentar a medida que X aumenta, se dice que la correlación es una *correlación positiva o directa*. Si Y tiende a disminuir a medida que X aumenta, se dice que es una *correlación negativa o inversa*”; (Wilks, 2011 y Taylor 1990)
- Segundo “el valor cercano o igual a cero indica poca o ninguna relación lineal entre las variables”;
- Tercero “valores de $r \leq 0.35$ (en valor absoluto) representa generalmente correlación débil”;
- Cuarto “valores entre $0.36 \geq r \leq 0.67$ (en valor absoluto) son considerados correlación moderada”;
- Quinto “valores entre $0.68 \geq r \leq 0.9$ (en valor absoluto) son considerados correlación alta”;
- Sexto “valores de $r \geq 0.9$ (en valor absoluto) son considerados correlación muy alta”;

Cabe resaltar que, las correlaciones no toman en cuenta los desvíos (bias) que puedan estar presentes en las series de tiempo, ya que proporcionan una buena información sobre la relación lineal entre las simulaciones y observaciones (Wilks 2011).

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

4.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizado en la zona sur del Perú, en la PC-RC, entre las coordenadas geográficas: 70°46' W a 71°34' W de longitud y 13° 30'S a 14°56' S de latitud. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación del área de estudio y en la Figura 4.2 se muestra las zonas de aridez del suelo.

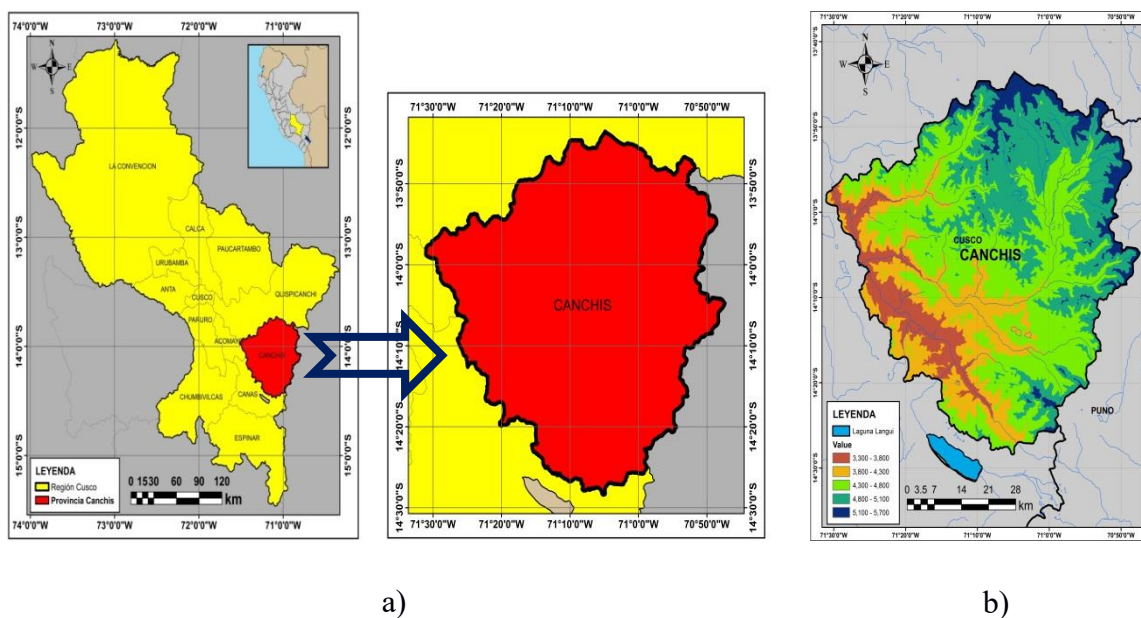


Figura 4.1. a) El área de estudio representado en rojo corresponde a la provincia de Canchis (Elaboración propia). b) El modelo de elevación digital de la provincia de Canchis (Elaboración propia).

(<http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/>) Fecha de acceso 12/2015.

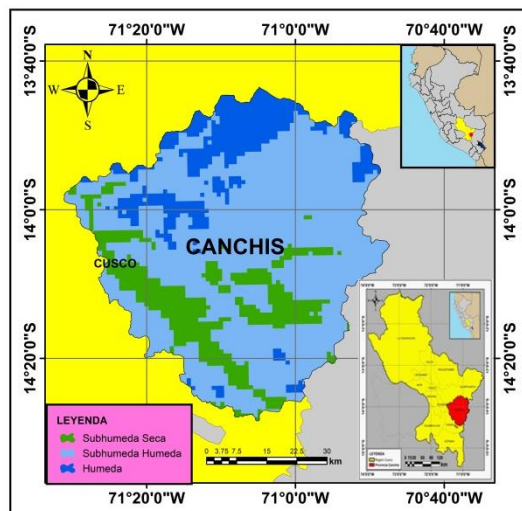


Figura 4.2. Zonas de aridez del suelo, MINAM 2011 (Elaboración propia).

4.1.1 Clima

En el plan de desarrollo concertado de la provincia de Canchis se describe que:

“La provincia Canchis, cuenta con una diversidad de pisos ecológicos que se distribuyen desde una altitud de 5,250 m.s.n.m. en el abra Chimboya, hasta los 3,446 m.s.n.m. en la parte baja del valle del Vilcanota (límite provincial), el mismo que determina la existencia de climas variados a lo largo del año. En las zonas altas de la provincia, disminuye la temperatura conforme aumenta la altitud, además de una intensa radiación solar y la dificultad para conservar el calor por la baja humedad atmosférica, factores determinantes para los cambios drásticos de temperatura entre el sol y la sombra o entre el día y la noche” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).

“Las comunidades alpaqueras comprendidas por encima de los 3,800 m.s.n.m. desarrollan actividades pecuarias en condiciones ambientales totalmente adversas, con temperaturas promedio de 6° C a 8° C y de 400 a 700 mm de precipitaciones pluviales. Estas comunidades alto andinas están destinadas a convivir con variaciones climáticas extremas, de día calor intenso y de noche temperaturas que llegan por debajo de los 0° C; condiciones sumamente extremas que implican altos y permanentes riesgos para las actividades

productivas, prioritariamente la crianza de alpacas” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).

“Los eventos climáticos de mayor recurrencia en comunidades con actividades destinadas al cultivo de papas nativas que se ubican por debajo de los 4, 300 m.s.n.m. son relativamente similares a las comunidades alpaqueras, con ciertas variaciones en el nivel de intensidad; del mismo modo las granizadas, heladas, y nevadas son eventos adversos de mayor incidencia, factores climáticos causantes de la mayor pérdida de cultivos” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).

En la provincia Canchis, se distinguen las siguientes **zonas de vida**:

- a) **“Bosque húmedo montano subtropical (Bh - MSt)**, posee alturas que se encuentran entre los 3500 a 4000 m.s.n.m., que representa el 17.09% de la superficie provincial, esta zona de vida se encuentra principalmente en Sicuani, Combapata y Marangani y su equivalente a zona agroecológica es la Suni-Puna” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).
- b) **“Páramo muy húmedo Subalpino Subtropical (Pmh - SaS)**, posee alturas que se encuentran entre los 4000 a 4500 m.s.n.m., que ocupa el 50.23% del total de la superficie provincial y se presenta con gran representatividad en los distritos de Checacupe, Pitumarca, Sicuani, San Pablo y Marangani y su equivalente a zona agroecológica es la Puna” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).
- c) **“Tundra pluvial alpino subtropical (Tp - AS)**, posee alturas que se encuentran entre los 4500 a 5000 m.s.n.m., que ocupa el 17.51% del territorio, esta zona de vida se encuentra distribuida principalmente en los distritos de Pitumarca, Checacupe y San Pablo y su equivalente a zona agroecológica es la Janca” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).
- d) **“Nivel subtropical (NS)**, posee alturas que superan los 5000 m.s.n.m., que representa el 11.87% de la superficie provincial, se encuentra principalmente en los distritos Pitumarca y Checacupe, su equivalente a zona agroecológica son los nevados” (PDC – Provincia de Canchis, 2013).

4.2. DATOS UTILIZADOS

Para el desarrollo de la presente tesis se consideran los datos del NDVI, la TSS, los datos de campo como la precipitación proporcionados por el SENAMHI y los datos agrícolas como la producción, la superficie cosechada y el rendimiento de cultivos.

4.2.1. NDVI – MODIS – TERRA

“El producto NDVI es uno de los índices de vegetación más ampliamente utilizados que se pueden obtener utilizando las bandas infrarrojo cercano (NIR) y rojo (R)” (Carbajal, G 2018). Desde principios de la década de 1980, los investigadores han utilizado NDVI, “que deriva del sensor AVHRR a bordo del satélite de la NOAA, para vigilar y evaluar el vigor de la vegetación terrestre” (Tucker y D' Souza, 1996). El NDVI correspondió a los factores climáticos, como la precipitación y la temperatura, y a su vez es utilizado para vigilar la sequía (Liu y Juarez, 2001; Wang et al., 2001.). Un sucesor de AVHRR, es MODIS a bordo del satélite TERRA que fue lanzado en diciembre de 1999. MODIS tiene 36 bandas espectrales entre $0.405 \mu m$ y $14.385 \mu m$ y también se utiliza para producir imágenes de NDVI a 250 m, 500 m y 1000 m de resolución espacial (Gallo et al., 2004). En el trabajo Carbajal, G (2018) “utiliza el producto NDVI mensual (MOD13A3) del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA que se obtiene de The Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS)” (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/task/area>) (Fecha de acceso 06/2018).

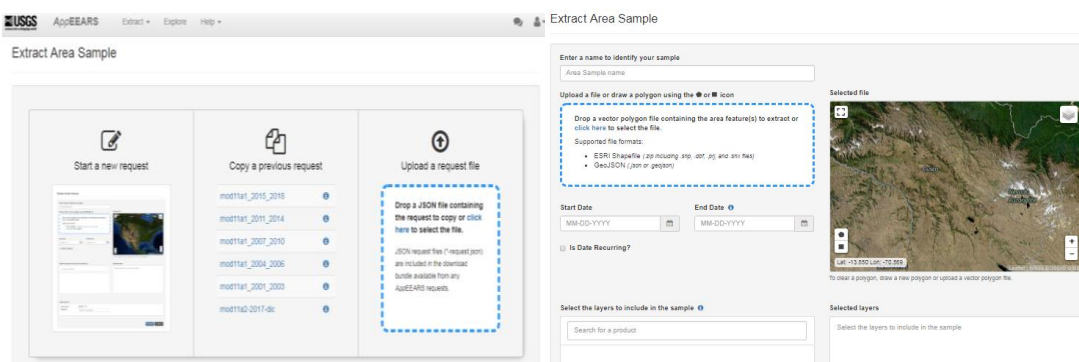


Figura 4.3. AppEEARS [<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/task/area>] Fecha de acceso 06/2018.

4.2.2. TSS – MODIS – TERRA

Los productos TSS-MODIS se crean como una secuencia de productos que comienzan con una franja (escena) y progresan, a través de transformaciones espaciales y temporales, para todos los días, para ocho días y también productos reticulados globales mensuales, lo que se utilizó con el algoritmo desarrollado por Wan y Dozier (1996). Los productos TSS implementan correcciones atmosféricas de gases, la dispersión de partículas de aerosoles y cirros delgados y eliminan el ruido de la nube de manera eficaz. En el presente trabajo, se usó el MODIS - TERRA diario. La TSS con resolución de 1 km (MOD11A1) de marzo del 2000 a diciembre del 2017 ha sido descargada del mismo portal AppEEARS como el NDVI. De conformidad con la resolución temporal (mensual) del NDVI, para obtener el valor mensual del TSS se calculó haciendo una ponderación que pertenece a cada mes, en base a datos de imágenes diarias proporcionados por los metadatos del TSS después de enmascarar el llenado de la información de la imagen y los valores perdidos (Rhee et al., 2010).

4.3. Datos en campo

A continuación, se describe los datos de precipitación mensual y los datos agrícolas obtenidos en el campo

4.3.1. Datos de precipitación mensual

Los datos de precipitación mensual se obtuvieron del SENAMHI del Perú, del periodo de 1981 hasta 2017 (<http://www.senamhi.gob.pe/>) (Fecha de acceso 06/2018). Para la provincia de Canchis de la región de Cusco, en el área de estudio, hay una estación meteorológica que cuentan con el 99% de información de datos históricos (Tabla. 4.1). Para el cálculo del IPE se usó toda la serie histórica y para la validación con los indicadores se seleccionó la información de marzo de 2000 a diciembre del 2017 (Anexo D).

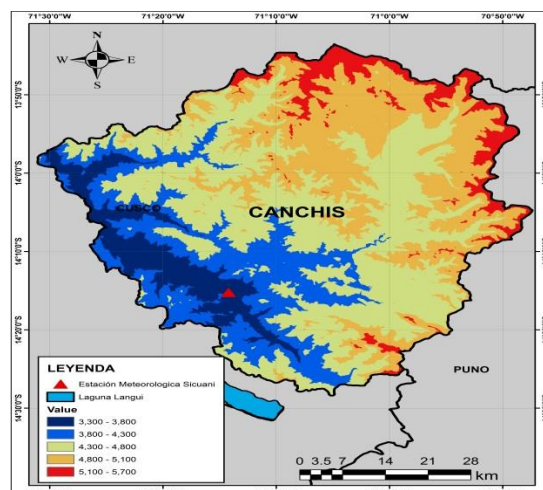


Figura 4.4. Estaciones meteorológicas del área de estudio. Facilitados por el SENAMHI.

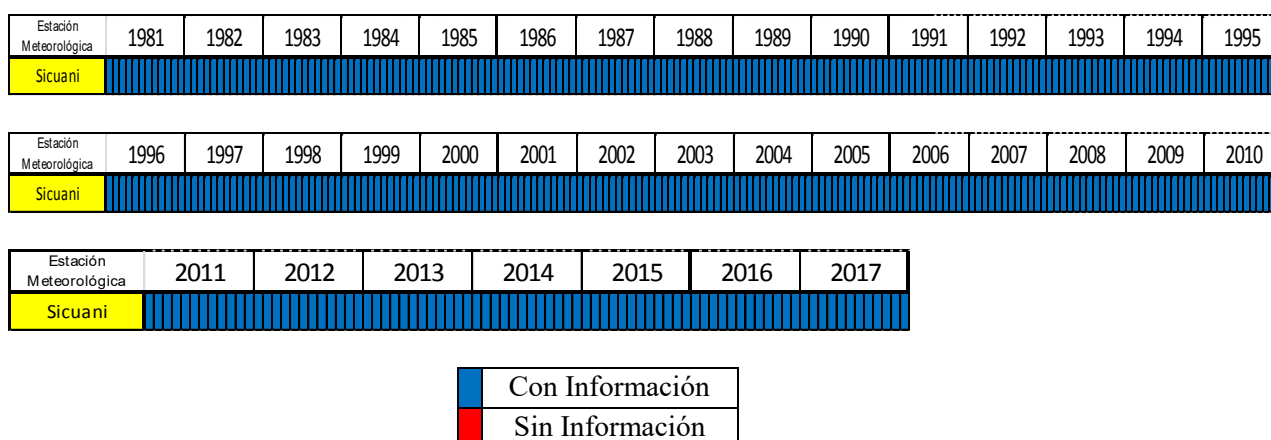


Figura 4.5. Diagrama de barras con y sin información mensual de la precipitación de la estación meteorológica Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco del periodo 1981 al 2017 (Elaboración propia).

4.3.2. Datos Agrícolas

La información histórica de cultivos de la provincia de Canchis de la región de Cusco de las superficies cosechadas fue proporcionada por el MINAGRI [MINAGRI., 2018), durante el periodo 2005 al 2017, donde el año 2005, 2008 y 2011, fue afectada por la sequía, por lo tanto, ésta influencio grandemente en la producción y rendimiento en todos los cultivos de la provincia Canchis de la región Cusco.

METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

5.1. Metodología

Esta investigación tiene como objetivo identificar y analizar los patrones de los índices de sequía generados mediante los productos como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y temperatura superficial del suelo (TSS) para la provincia de Canchis de la región Cusco (PC-RC). Pero diferentes datos satelitales no pueden compararse y sintetizarse directamente entre sí. Por lo tanto, las múltiples fuentes de imágenes satelitales se deben escalar y deducir a una serie de parámetros de sequía. En la Figura. 5.1. Se muestra el diagrama de flujo del presente trabajo de tesis.

5.2. Procesamiento de los productos

Los productos NDVI – MODIS y TSS - MODIS (10:30 AM) del nivel 6, son georreferenciado en la proyección geográfica y en el datum WGS84. La extensión de los productos MOD11 y MOD13 distribuidos por la NASA corresponden a 5 minutos de observación del sensor, ambos con una resolución espacial de $1km \times 1km$. Los productos NDVI y TSS del MODIS-Terra se identifican de manera estándar con el prefijo “MOD”.

Se dispone el producto TSS diurna, promedio diario, para el periodo de estudio desde marzo 2000 a diciembre 2017.

Se trabajó con 6447 productos TSS-MOD11, 365 productos por año, considerando que esto varía: si el año es bisiesto entonces le corresponde 366 días.

Se dispone el producto NDVI – MODIS con una resolución temporal mensual, para el periodo marzo del 2000 a diciembre del 2017. Se trabajó con 215 imágenes NDVI-

MOD13, 12 productos por año, mientras que en el año 2000 se dispone de 11 productos MOD13.

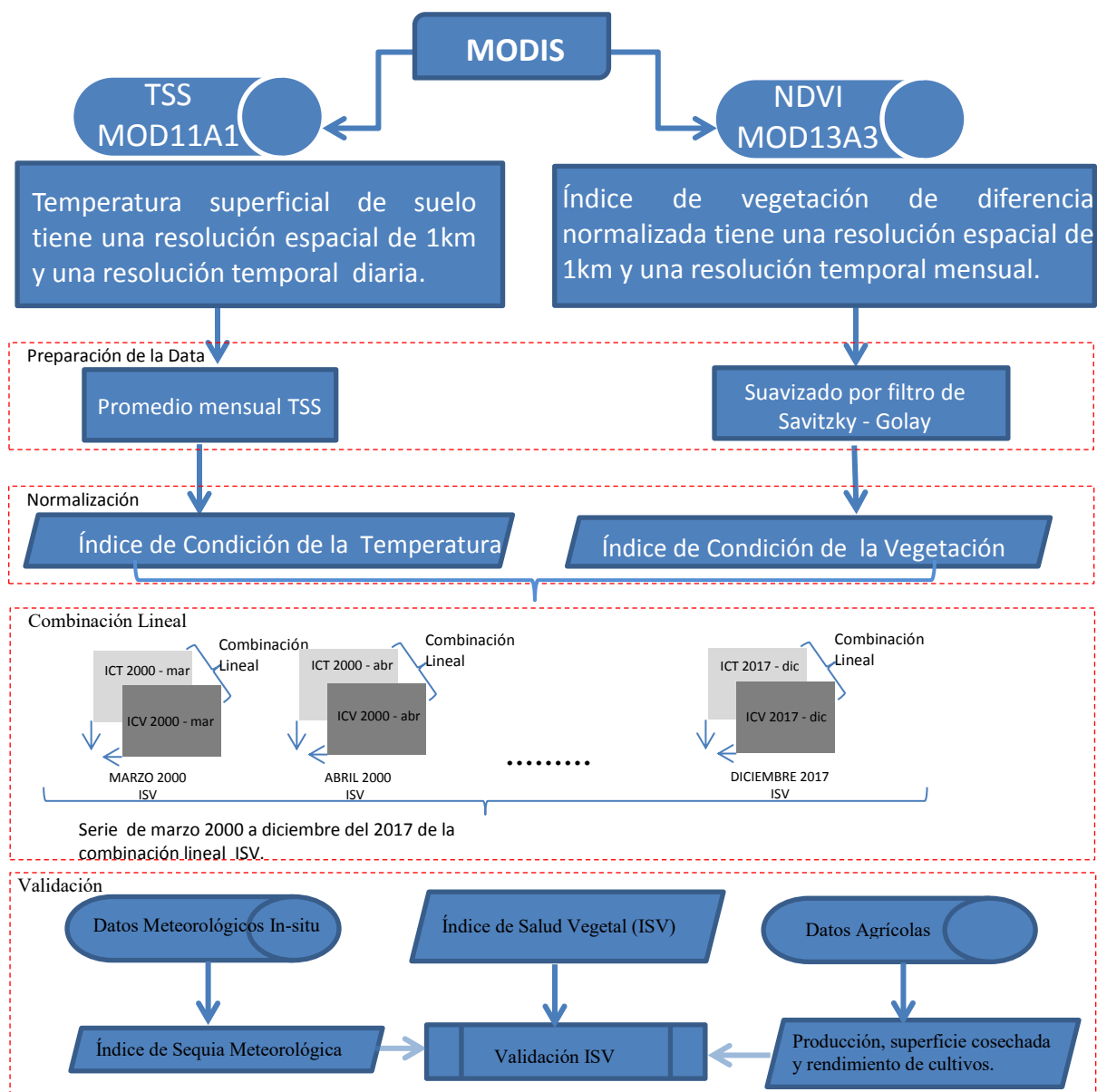


Figura 5.1. Diagrama del cálculo de los índices de sequía y su validación (Adaptado de Du et al., 2013 y Bhuiyan et al., 2006).

En este estudio se utiliza datos de precipitación mensual, desde el año 1981 hasta 2017, proporcionados por el SENAMHI de la provincia de Canchis de la región de Cusco, hay una estación meteorológica, llamada Sicuani y se encuentra en el distrito de Sicuani. Siendo

la única estación meteorológica en la cual se ha obtenido los índices de precipitación estandarizados (IPE), lo que usa para evaluar los índices de sequía.

En este estudio se utiliza datos de superficie cosechada, producción y rendimiento de cultivo anualmente desde el año 2005 hasta 2017, proporcionados por el MINAGRI de la provincia de Canchis de la región de Cusco.

Dado el elevado número de imágenes, para el procesamiento de los productos, se han diseñado algoritmos en lenguaje R (Rstudio) para la automatización de los procesos de cálculo. Los algoritmos utilizan funciones propias de R para la aplicación del cálculo del IPE, la combinación lineal y la generación de las series.

5.2.1. Preparación de los productos

Para determinar el NDVI, se realizó el control de calidad como indica (Carbajal et al., 2018). Para la TSS se hizo un cálculo del promedio diario para obtener el producto de la TSS mensual. Para conseguir la transformación en Kelvin y luego convertir a Celcius, se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$T_C = (T_K * fs) - 273.15, \quad (5.1)$$

donde:

T_C : Temperatura superficial del suelo en grados Celsius,

T_K : Temperatura superficial del suelo en grados Kelvin,

fs : Es el factor de escalado de 0.02, requerido en la transformación de datos tipo entero a datos tipo real y -273.15 es el valor de transformación de la temperatura de K a $^{\circ}C$.

Una vez hecha la transformación a grados Kelvin, se procede a calcular los promedios mensuales de la temperatura de la superficie del suelo diurna.

5.2.2. Normalización

Inicialmente, los productos de TSS y NDVI tienen la misma resolución espacial de 1km y resolución temporal mensual, y luego dichos productos se apilan todos los meses de eneros

y los meses de febreros desde el año 2001 al 2017. Posteriormente se procedía hacer lo mismo, pero los meses de marzos, abril y así hasta diciembre desde el año 2000 al 2017 para el caso de la temperatura superficial del suelo (TSS) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). En la Figura 5.2., se presenta un ejemplo.

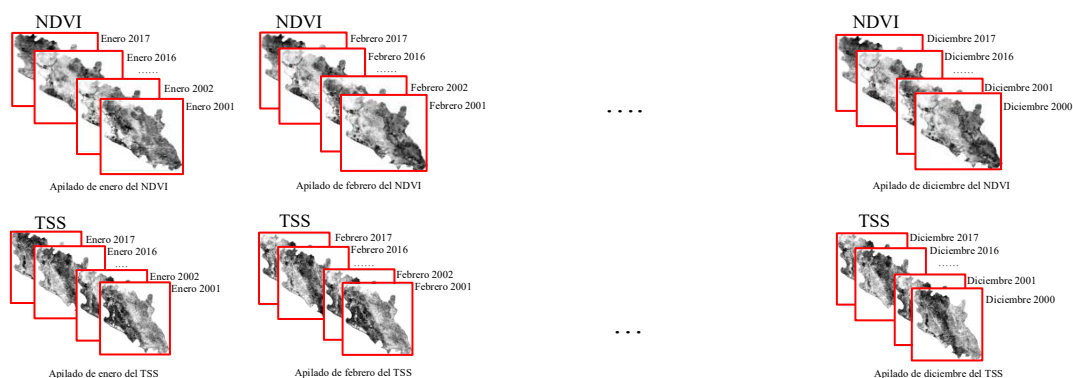


Figura 5.2. Apilado por mes para la TSS y del NDVI correspondiente al área de estudio PC-RC (Elaboración propia).

5.2.2.1 Máximo y mínimo valor de los productos del NDVI y TSS

La presente técnica “selecciona el mayor y el menor valor numérico de un pixel dado, en diferentes fechas.” (Bai et al., 2005). Ver la Figura 5.3.

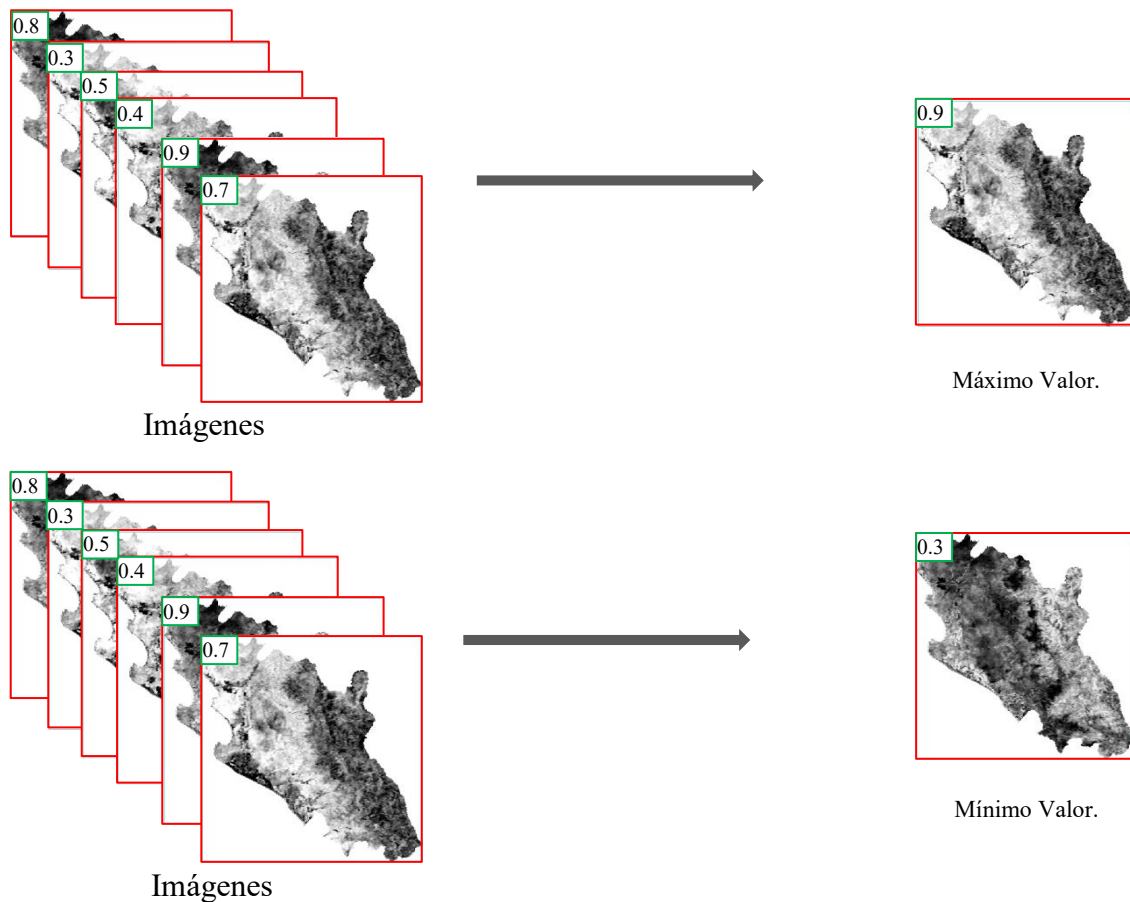


Figura 5.3. Ejemplo del máximo y mínimo valor de los productos del NDVI y TSS (Elaboración propia).

5.2.2.2 Cálculo de los indicadores de sequía

La técnica de máximo valor y mínimo valor se aplica para la TSS y el NDVI y fueron agrupados como se muestra en la Figura 5.2. Luego se procedió al cálculo de los indicadores de sequía como el ICV, ICT e ISV mencionada en la sección 3.1.

5.3. Evaluación del índice de salud vegetal (ISV) con el índice de precipitación estandarizado (IPE)

El índice de precipitación estandarizado (IPE), desarrollado por McKee et al. (1993, 1995), es definido como la diferencia entre la precipitación total mensual histórica y su media estacional a largo plazo entre la desviación estándar (Giuseppe R. et al., 2007). Una de las ventajas significativas del IPE es que se puede calcular para diferentes escalas de tiempo, para vigilar las sequías meteorológicas con respecto al inicio, gravedad, duración, extensión y el final. La serie de tiempo IPE de la estación meteorológica Sicuani perteneciente a la región de Cusco de la provincia de Canchis, durante los años 1981-2017, se ha calculado utilizando los datos de precipitación mensual total en campo y para la validación del ISV se utilizó el IPE calculado para el periodo 2000-2017. Dado que la influencia de la sequía sobre la vegetación tiene alrededor de 3 meses de desfase en zonas subhúmedas secas y semiáridas (Udelhoven et al., 2009), una escala de 3 meses IPE (IPE3) se calculó en este trabajo. El IPE3 refleja las condiciones de humedad a mediano plazo y proporciona una estimación estacional de la precipitación. Por lo tanto, es más adecuado en comparación con la media del ISV en la zona subhúmeda seca, clasificada de acuerdo al índice de aridez. El mapa temático del ISV obtenido se promedió espacialmente para luego llevar a cabo el análisis de correlación del IPE3, que se calculó a partir de la estación meteorológica correspondiente.

La evaluación de los índices ICV, ICT e ISV, proporcionada por el sensor MODIS con el IPE3, se realizó mediante regresión lineal simple. Como buen ajuste del modelo se ha utilizado el coeficiente de correlación lineal de Pearson.

RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los productos NDVI (10:30 a.m.), y de la temperatura superficial del suelo diurna (10:30 a.m.). Se presenta los patrones espaciales de la condición de sequía en la provincia de Canchis de la región Cusco (PC-RC) del 2000 al 2017 que fueron monitoreados mediante el ICV, el ICT e ISV en esta investigación. El ISV se obtuvo mediante la combinación lineal a partir de los índices como el ICV e ICT. También a partir de los datos en campo de precipitación mensual de la estación meteorológica Sicuani del SENAMHI se calculó la serie histórica del IPE a corto y a largo plazo.

Se identificó las áreas de sequía mediante los patrones espaciales y el análisis de la variación del ISV en el área de estudio afectada por los niveles de sequía leve, severa y moderada y por el análisis de correlación de Pearson de la producción, de la superficie cosechada y del rendimiento con el ISV, ICV y NDVI.

6.1. Serie de tiempo y análisis de correlación de Pearson del NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco

En la Figura 6.1 se muestra la serie de tiempo de promedio espacial mensual de NDVI y TSS, en la que se visualiza valores mayores del NDVI, es decir se observa que la vegetación es vigorosa, la temperatura es baja y esto ocurre en las épocas húmedas entre los meses de octubre a marzo, en el otro caso los valores menores del NDVI, es decir cuando la vegetación es pobre, la temperatura aumenta y esto ocurre en las épocas secas de los meses de abril hasta setiembre. También se observa que, en los años 2005, 2010 y 2016 valores de

temperatura están por encima de los 15°C, mientras que en los demás años están por encima de los 10°C.

En la Figura 6.2 se presenta el gráfico de dispersión entre las series de tiempo del promedio espacial mensual del NDVI y la temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco, para el periodo de los meses marzo 2000 y hasta diciembre 2017. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y su valor es igual a -0.83, lo que nos indica que existe una correlación inversa de la serie de tiempo y esto tiene relación con la Figura 6.1.

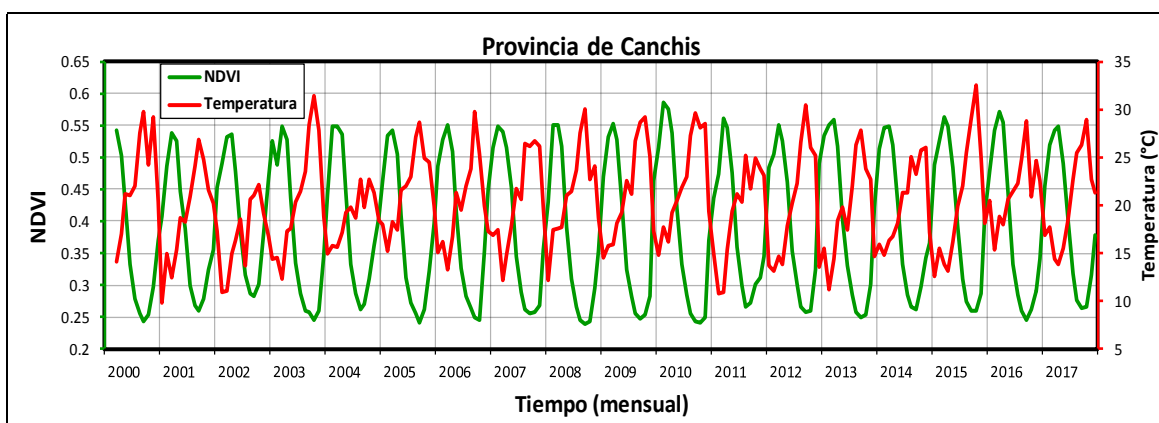


Figura 6.1. Serie de tiempo del NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco.

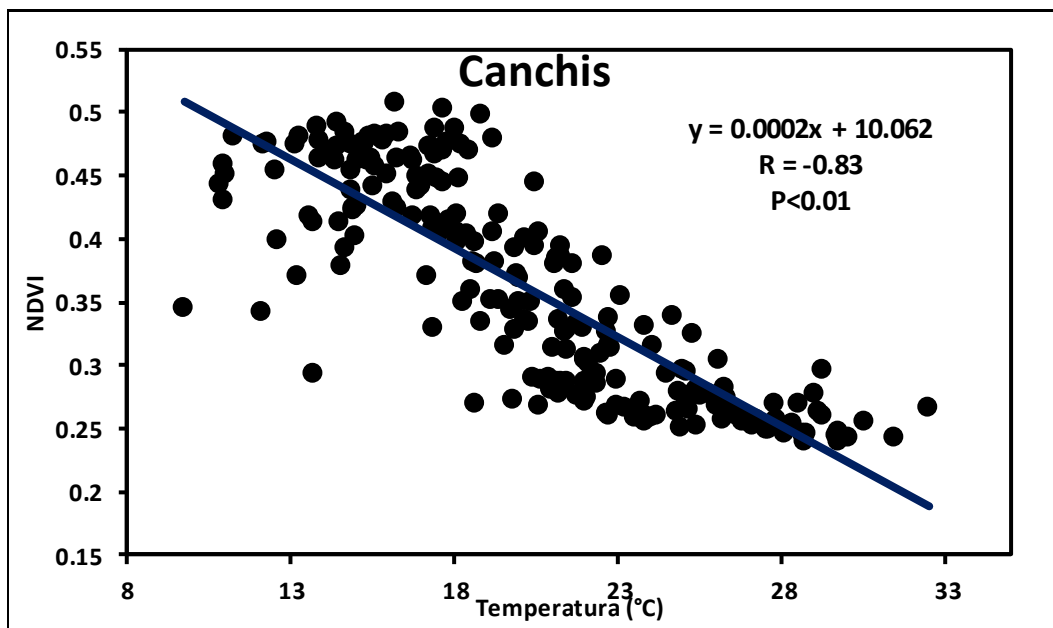


Figura 6.2. Diagrama de dispersión entre la serie del NDVI y temperatura superficial del suelo de la provincia de Canchis de la región Cusco.

6.2. Serie de tiempo del promedio anual del ICV, ICT, NDVI y TSS de la provincia de Canchis de la región Cusco

En la Figura 6.3 se muestra el promedio anual de la serie de tiempo del NDVI y TSS, y se visualiza que cuanto los valores mayores del NDVI, la TSS es menor y cuando los valores menores al 0.35 del NDVI, la TSS en promedio anual es alta o mayor a 20°C. También se muestra el ICV e ICT obtenidos del NDVI y TSS lo cual muestra mejor los años de sequía para 2000, 2005, 2008 y 2016.

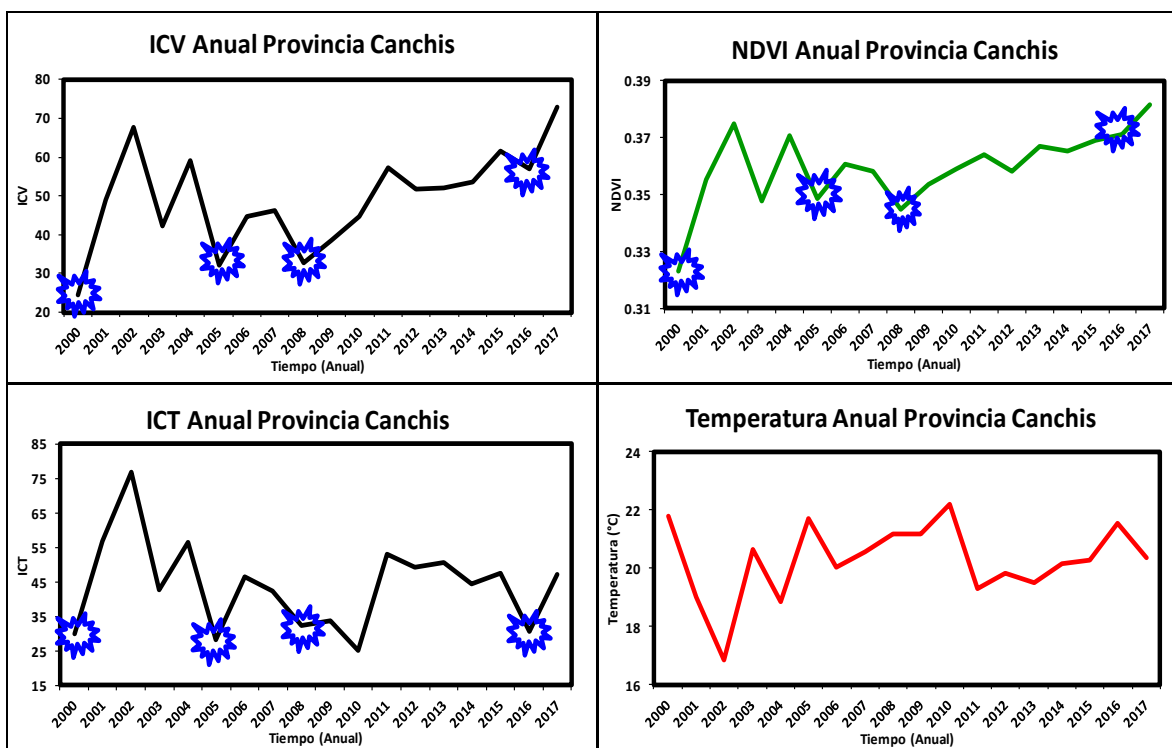


Figura 6.3. Serie de tiempo del promedio anual del ICV, ICT, NDVI y temperatura superficial del suelo de la PC-RC.

6.3. Serie de tiempo de la precipitación de la estación Sicuani – Región de Cusco

En la Figura 6.4 se muestra la serie de tiempo mensual de la precipitación de la estación de Sicuani de la región de Cusco.

En la Figura 6.5-a) se muestra la serie de tiempo del promedio anual de la precipitación, en los años 2000, 2005, 2007 - 2010 y 2014, lo que nos indica que la precipitación está por debajo de 60 mm.

En la Figura 6.5-b) se muestra la serie de tiempo el promedio del periodo húmedo donde los años con déficit de precipitación son 2000, 2004-2006, 2008, 2015, ya que el promedio de precipitación en el periodo húmedo está por debajo de 100 mm.

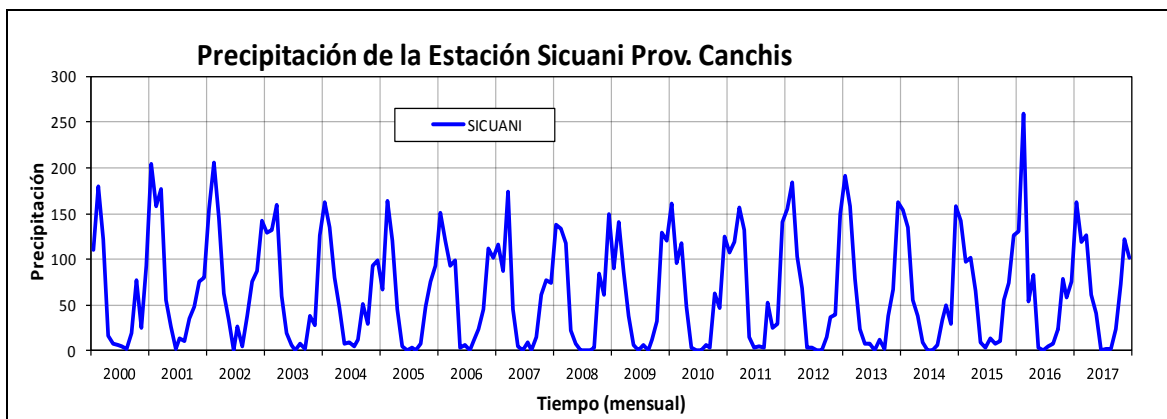
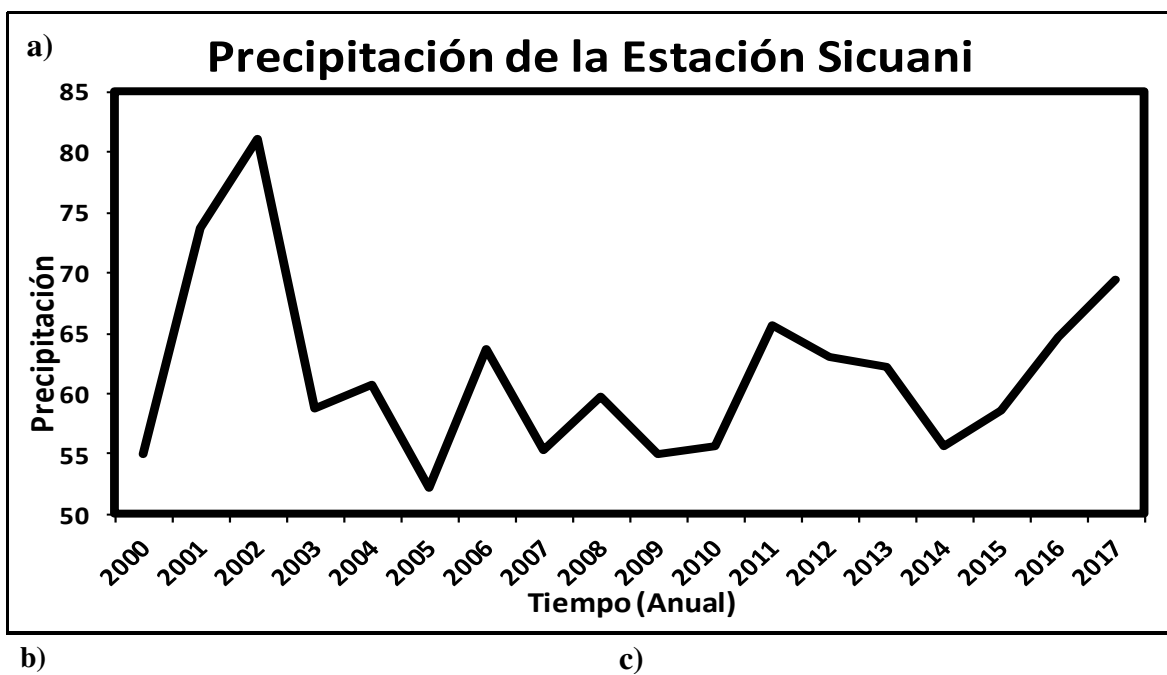


Figura 6.4. Serie de tiempo mensual de la precipitación de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región de Cusco.

Finalmente, en la Figura 6.5-c) se muestra la serie de tiempo del promedio del periodo seco de cada año, también se observa en la serie de tiempo el periodo seco el déficit de precipitación, son años de sequía 2000, 2005 y 2008.



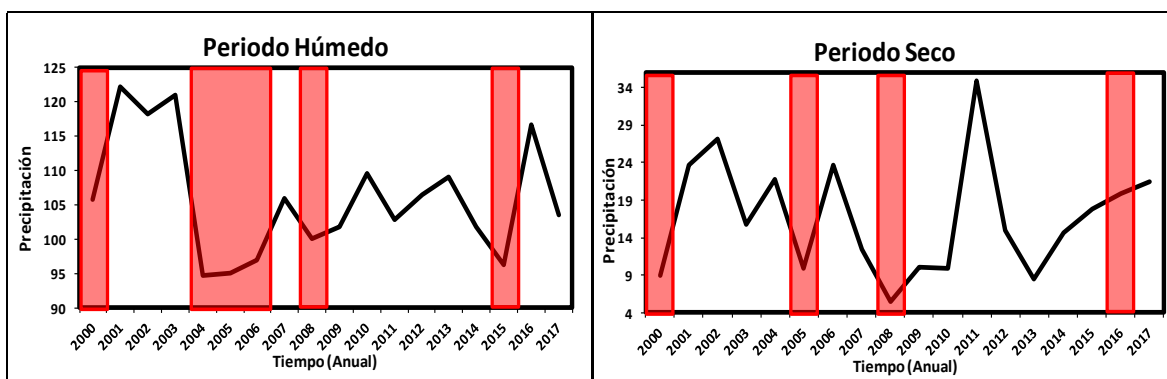


Figura 6.5. De la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco se presenta; **a)** Serie de tiempo anual de la precipitación, **b)** Serie de tiempo anual de los periodos húmedos y **c)** Serie de tiempo anual de los periodos secos.

6.4. Análisis de los lags entre el NDVI y la precipitación

En la Tabla 6.1 se observa la correlación de Pearson de la serie de tiempo de promedio espacial mensual de NDVI y la precipitación mensual de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco, el NDVI con la precipitación sin desfase su correlación es de 0.58, el NDVI con un mes de desfase con la precipitación tienen una muy buena correlación de 0.84, en el caso de dos meses de desfase también tiene una muy buena correlación de 0.85 y por último con un desfase de tres meses tiene una correlación de 0.62.

ESTACIÓN METERORO- LÓGICA	DESFASE O LAGS ENTRE NDVI Y PRECIPITACIÓN (MENSUAL)							LATITUD (°S)	LONGITUD (°W)	ALTURA (msnm)
	-3	-2	-1	0	1	2	3			
Sicuani	-0.59	-0.25	0.18	0.58	0.84	0.85	0.62	-14.253	-71.237	3574

Tabla 6.1. Desfase o Lags entre el NDVI y precipitación de la estación meteorológica Sicuani de la región de Cusco.

6.5. Serie de tiempos de los índices de precipitación estandarizados IPEs

Se analizaron las sequías a corto plazo, en base a la identificación de los eventos secos de las series del IPEs promedio para la estación meteorológica de Sicuani de la provincia de

Canchis de la región Cusco a corto plazo (IPE-3) y se caracterizaron las sequías en términos de su duración, intensidad y severidad (Santos et al., 2010).

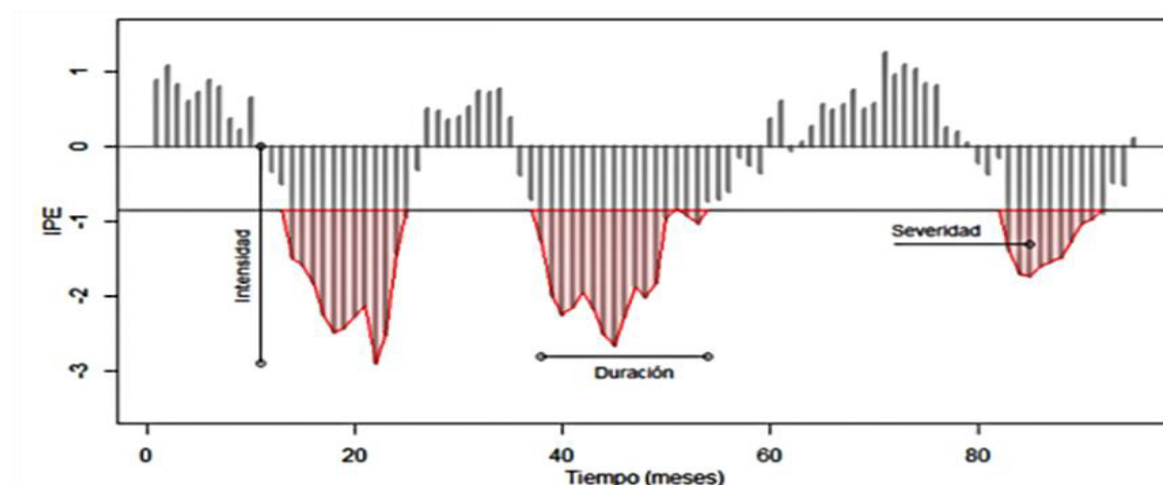


Figura 6.6. Caracterización de la sequía.

Se utilizó un nivel de umbral fijo para definir los eventos secos, sin variar en espacio y tiempo y se aplicó a las series de IPE de la estación de Sicuani. El umbral definido fue de -0.50, que expresa el cuantil para el 19% de probabilidad de la distribución normal estandarizada, y se “clasifica un evento de sequía cuando el IPE está debajo de este umbral, como se muestra en la Figura 6.6. Basado en este umbral se determinaron eventos de sequía clasificados en términos de su duración, severidad e intensidad. La duración se definió como el periodo de tiempo consecutivo e ininterrumpido con valores de IPE por debajo del umbral (meses), la severidad se definió como la suma de los déficits de un evento de sequía y la intensidad se definió como el valor más bajo del IPE durante un evento de sequía” (Vega, 2018).

En la Figura 6.7. Se muestran los índices de precipitación estandarizado (IPE) durante los años desde el 1981 hasta 1984 una larga duración de sequía, siendo los años 1982 al 1984, 1991, 2007 y 2016 de mayor intensidad y luego los años del 1987 hasta el 1989, 2003, 2005, 2008, 2010 y 2016 que son periodos de sequía severa.

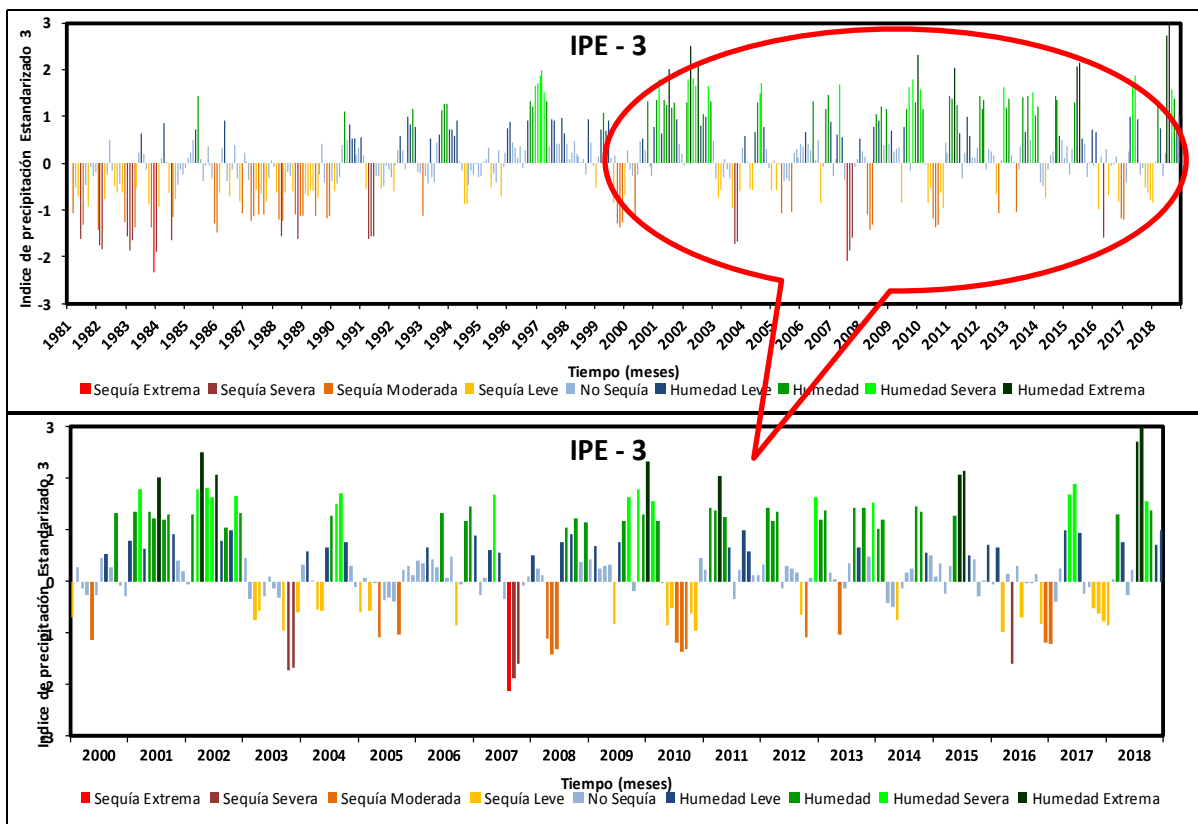


Figura 6.7. Serie de tiempo mensual del IPE – 3 de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.

Se analizaron las sequías a largo plazo, en base a la identificación de los eventos secos en las series de IPE de la estación meteorológica de Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco a largo plazo (IPE-12) y se caracterizaron las sequías en términos de duración, intensidad y severidad (Santos et al., 2010), bajo el mismo concepto del análisis de las sequías a corto plazo del presente estudio.

En la Figura 6.7. Se muestran los IPEs de los años desde el 1981 hasta 1984 y del 1986 hasta 1990 en ambos una larga duración, una gran severidad y mayor intensidad sequía. Además, siendo los años 1991, 1992, 2000, 2003, 2005, 2008 y 2016 son periodo de corta duración, menor severidad e intensidad sequía para La provincia de Canchis - Cusco.

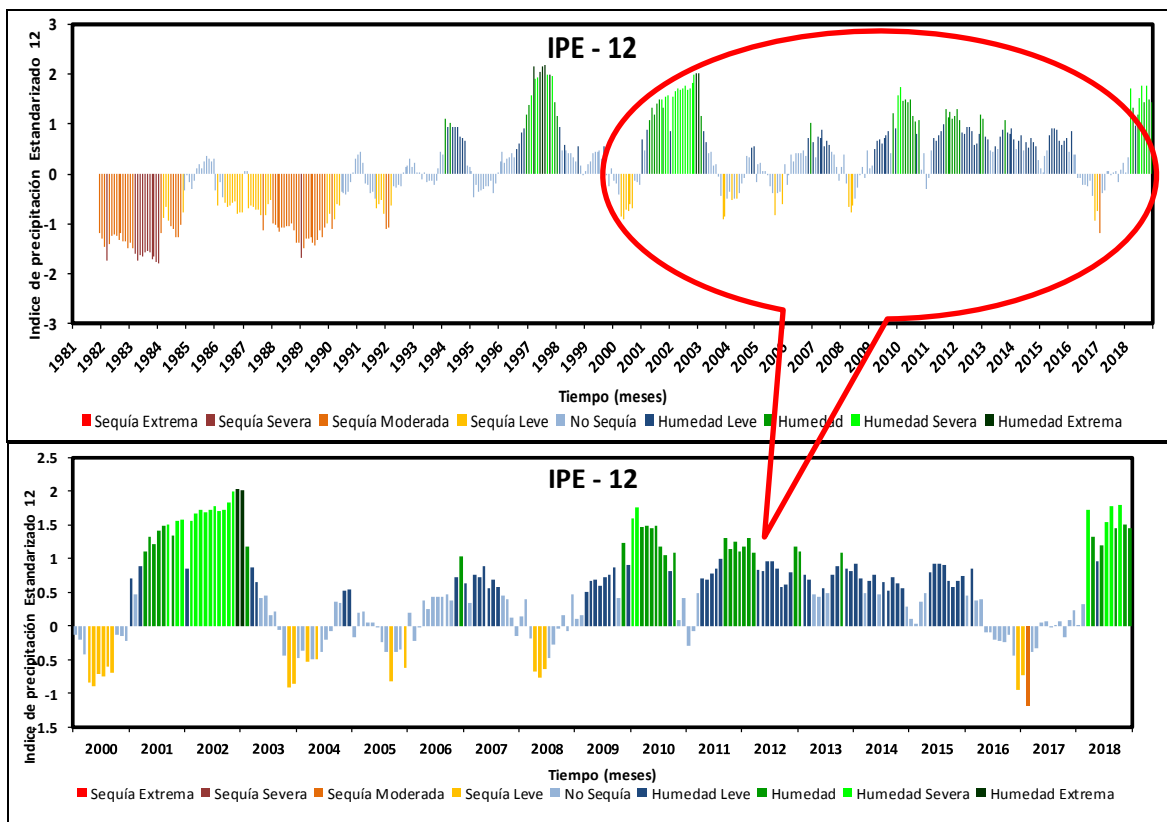


Figura 6.8. Serie de tiempo mensual del IPE – 12 de la estación Sicuani de la provincia de Canchis de la región Cusco.

6.6. Patrones del ISV en la provincia de Canchis – Cusco

En la presente investigación se muestra los patrones de sequía del ISV para los años 2000, 2003, 2005, del 2008 al 2010 y 2016, también se visualiza la sequía anualmente en los patrones espaciales basado en el ISV en la provincia de Canchis de la región Cusco, en el periodo marzo 2000 al diciembre 2018.

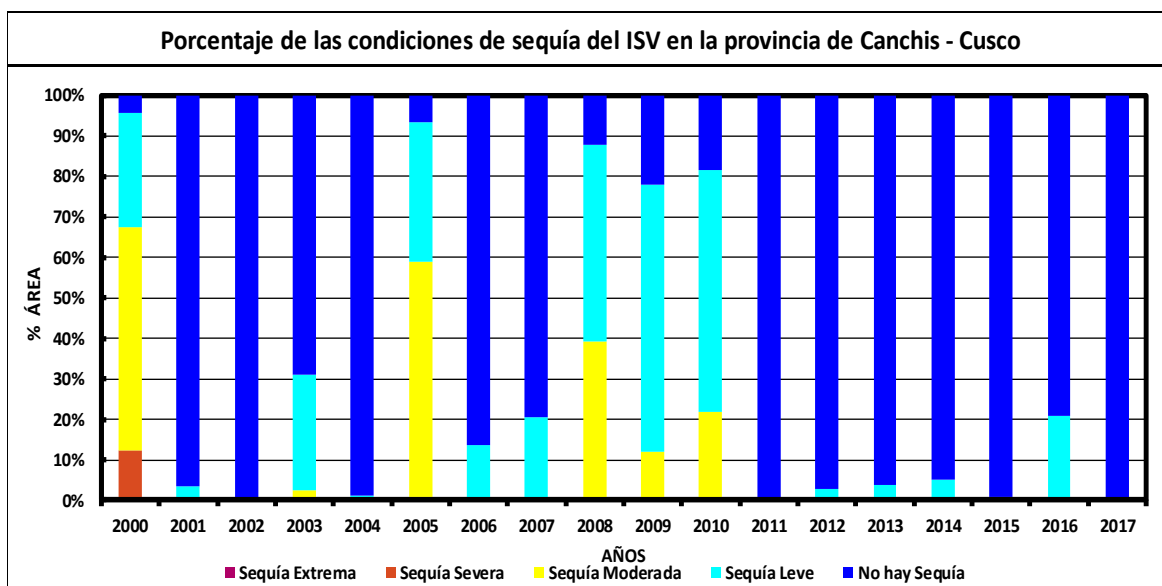


Figura 6.9. Porcentaje de áreas de las condiciones de sequía de la provincia de Canchis de la región de Cusco durante el periodo 2000 al 2017.

En la Figura 6.9, donde se muestra: El +12 % de áreas en condiciones de sequía severa, +55 % de superficie en condiciones de sequía moderada, además +28 % de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2000. El +57.8 % de superficie en condiciones de sequía moderada, además, el 34% de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2005. El +39 % de superficie en condición de sequía moderada además +48.5 % de superficie en condición de sequía leve durante el 2008. El +11.7 % de superficie en condiciones de sequía moderada además el 66% de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2009. El +21.7 % de superficie en condiciones de sequía moderada además el 59.7% de superficie en condiciones de sequía leve durante el 2010. Y por último el +20.3 % de superficie en condición de sequía leve durante el 2016.

6.7. Serie y evaluación de los índices de sequía con la producción, superficie cosechada y rendimiento de la provincia de Canchis – Cusco

Por su parte, los reportes del MINAGRI señalan los años 2005, 2008, 2011 y 2016 como periodos de sequía, se observa en los descensos en la serie de tiempo de superficie cosechada y producción, también se observa una línea referencial color rojo punteada que señala la evolución esperada en caso no hubiera sucedido eventos de sequía en esos años,

esto permite visualizar mejor el inicio, la duración y el tiempo de recuperación (Figura 6.10.). Las series muestran una correlación de Pearson es igual a 0.84 entre producción y superficie cosechada.

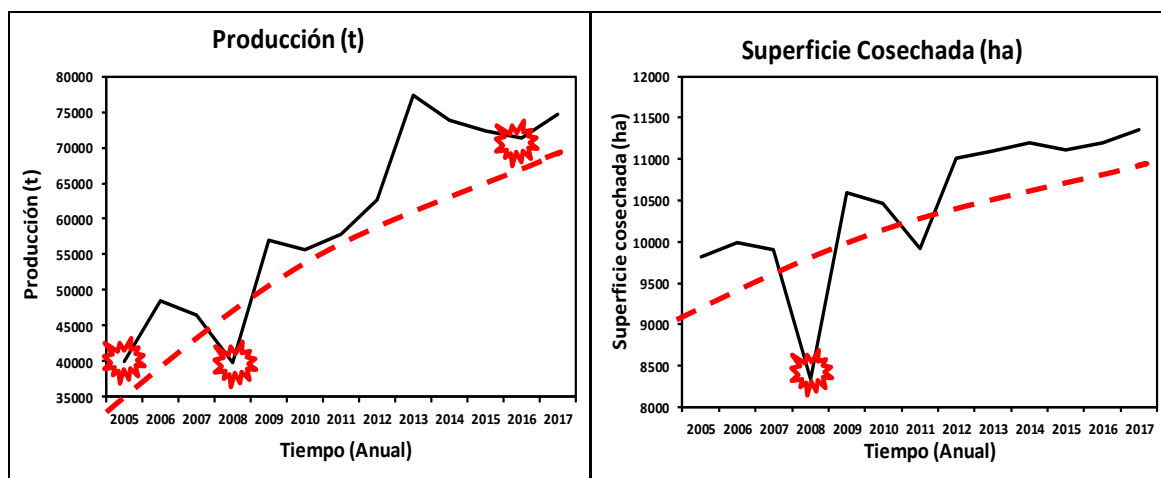


Figura 6.10. Serie de producción y superficie cosechada de la provincia de Canchis de la región Cusco.

Evaluando la serie de tiempo del NDVI con la producción, la superficie cosechada y el rendimiento de los cultivos, se muestra una correlación de 0.84, 0.78 y 0.80 respectivamente. Para las series de tiempo del ICV con la producción, con la superficie cosechada y con el rendimiento, se muestra una correlación de 0.81, 0.72 y 0.80 respectivamente y la serie de tiempo del ISV con la producción, superficie cosechada y rendimiento, se obtiene una correlación de 0.73, 0.60 y 0.75, respectivamente (ver la Figura 6.11).

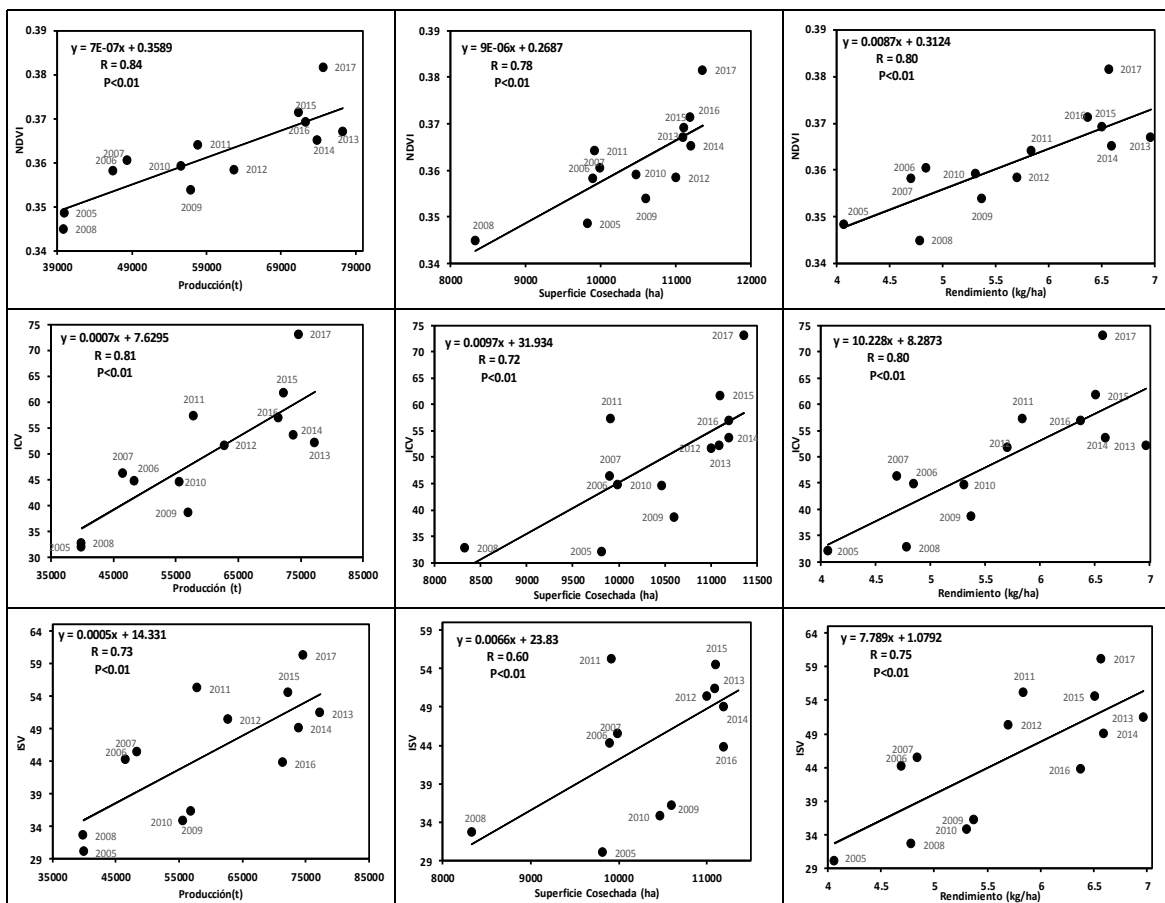


Figura 6.11. Graficas del análisis de correlación de Pearson de la serie de tiempo anual de la provincia de Canchis de la región Cusco.

CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones

1. El patrón espacial del índice de salud vegetal (ISV) es una combinación lineal de dos índices, como, el índice de condición de vegetación (ICV) que utiliza información de los canales visible e infrarrojo cercano (generalmente NDVI) y el índice de condición térmica (ICT) basado en los datos de los canales infrarrojos térmicos (generalmente temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera o temperatura de la superficie de la tierra). Como no existe un conocimiento a priori sobre la contribución de ICV y ICT a la salud de la vegetación, generalmente se asignan pesos iguales a ambos (Kogan, 2001). El objetivo de esta tesis fue identificar los patrones espaciales, durante el período 2000–2017, evaluar las contribuciones relativas de ICV e ICT a ISV, para la provincia de Canchis de la región Cusco para identificar mejor la sequía.
2. La validación del promedio anual del NDVI, ICV e ISV con la producción, la superficie cosechada y el rendimiento para la provincia de Canchis de la región Cusco está bien correlacionada, la cual refleja la influencia de la sequía en la agricultura. El NDVI, el ICV y el ISV es reflejado en los reportes de la campaña agrícola ejecutados por el gobierno regional de Cusco de la provincia de Canchis.
3. los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que el análisis de los desfases entre el NDVI y la precipitación se encuentra en muy buena correlación.
4. La serie de tiempo de los IPEs ayudó analizar los niveles de sequía a corto plazo y a largo plazo, donde mostraron que los años de sequía son el 2000, 2005, 2008 y 2016, lo mismo que se caracterizaron las sequías en términos de su duración, intensidad y severidad.
5. Para el año 2017, el ISV muestra que no hay sequía, debido al fenómeno del niño.

7.2. Recomendaciones

1. Se recomienda para una investigación posterior también incluir información sobre la humedad del suelo para poder evaluar el inicio, la duración, el alcance y la gravedad de la sequía.
2. Se recomienda a SENAMHI implementar datos en campo de temperatura superficial del suelo.
3. Para determinar la sequía meteorológica se recomienda incorporar datos PISCO – SENAMHI sobre la precipitación.
4. Para determinar la sequía hidrología se recomienda incorporar datos de caudal de las cuencas hidrográficas para cada zona de aridez.
5. Se recomienda con mayor exactitud estudiar patrones de circulación atmosféricos que controlan la variabilidad de las lluvias.

REFERENCIAS

- Abramowitz M, Stegun A. 1965. *Handbook of Mathematical formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, inc.: New York.
- Allaby, M.H. (Ed.), 2007. *Encyclopedia of Weather and Climate*. Facts On File, New York.
- Anculle Condorchoa, Tony Edgar. 2016. Modelo del inicio de la sequía en la costa norte de Perú a partir del NDVI de los sensores AVHRR, VEGETATION, MODIS y los datos ENOS (1982-2013). Tesis de Maestría en Física, Mención Geofísica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú.
- AMS, 2004. American Meteorological Society. Statement on meteorological drought. Bull. Am. Meteorol. Soc. 85, 771–773.
- <https://www.highbeam.com/doc/1P3-654400081.html>
- <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/archive-statements-of-the-ams/meteorological-drought/>
- Fecha de acceso: 30 de enero de 2017
- AppEEARS [<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/task/area>] (Fecha de acceso 06/2018).
- Bai, Z. G., D. L. Dent, H. Bartholomeus and M. E. Schaepman. 2005. Assessing land degradation and improvement using NASA GIMMS, Shaanxi, China, Remote sensing and geoinformation processing in the assessment and monitoring of land degradation and desertification, Trier, Germany, pp. 128-135.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Martínez, A., 2010. A multiscale global drought dataset: the SPEIbase – a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. Bulletin of the American Meteorological Society 91 (10), 1351–1356.
- Bento, V. A., Gouveia, C. M., DaCamara, C. C., Trigo, I. F., 2018. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. Agricultural and Forest Meteorology 259. 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.014>.
- Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N., 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 8 (4), 289–302.
- Brown, J.F., Wardlaw, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J., Reed, B.C., 2008. The vegetation drought response index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. GIScience & Remote Sensing 45 (1), 16–46.

- Carbajal, G., 2018. Identificación de patrones relevantes a la sequía agrícola a partir del análisis espacial y temporal del Índice de Condición de la Vegetación – Caso estudio: Áreas agrícolas de la región Piura, Perú (2000 - 2017). Revista ECI. Vol. 12, Número 2. DOI: <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2018.0013/>
- Chang, T.J., Kleopa, X.A., 1991. A proposed method for drought monitoring. Water Resour. Bull. 27, 275–281.
- Chang, T.J., Stenson, J.R., 1990. Is it realistic to define a 100-year drought for water management? Water Resour. Bull. 26 (5), 823–829.
- Chen, J., Jonsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. Remote Sensing of Environment 91 (3–4), 332–344.
- Clausen, B., Pearson, C.P., 1995. Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. J. Hydrol. 173, 111–130.
- Cook, E.R., Seager, R., Cane, M.A., Stahle, D.W., 2007. North American drought: reconstructions, causes, and consequences. Earth-Sci. Rev. 81, 93–134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.12.002>.
- Dai, A. 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (1): 45-65.
- Ding, Y., Hayes, M.J., Widhalm, M., 2011. Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. Disaster Prev. Manag. Int. J. 20, 434–446. <http://dx.doi.org/10.1108/09653561111161752>.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G., 1980. On the statistical characteristics of drought events. Water Resour. Res. 16 (2), 289–296.
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y., 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 23, 245-253.
- Edwards DC, McKee TB. 1997. *Characteristic of 20th century drought in the United States at multiple timescales*. Colorado State University: Fort Collins, Climatology Report No 92–2.
- Eltahir, E.A.B., 1992. Drought frequency analysis of annual rain-fall series in Central and Western Sudan. Hydrological Sci. J. 37 (3), 185–199.
- Estrela, M.J., Penarrocha, D., Milla' n, M., 2000. Multi-annual drought episodes in the Mediterranean (Valencia region) from 1950–1996. A spatio-temporal analysis. Int. J. Climatol. 20, 1599–1618.

- FAO (Food and Agriculture Organization), 1983. Guidelines: Land evaluation for Rainfed Agriculture. FAO Por sus siglas en ingles (Food and Agriculture Organization) Soils Bulletin 52, Rome.
- Ferraro, S.A., Curutchet, G., Tasat, D.R. 2009. Impacto biológico adverso sobre las vías respiratorias inducido por material particulado proveniente de sedimentos del Río Reconquista. En: Lucas Fernández Reyes, Alejandra V. Volpedo y Alejo Pérez Carrera (Eds), *Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 190-199. ISBN: 978-987- 96413-9-2.
- Frick, D.M., Bode, D., Salas, J.D., 1990. Effect of drought on urban water supplies. I: drought analysis. J. Hydrological Eng. 116, 733–753.
- Galván Ortiz, Luis Manuel. 2011. Impacto de la Sequía Meteorológica en la Vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982 - 2006). Tesis para optar el Grado de Maestro en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García Marín, R. (2008). Riesgo de Sequía y Vulnerabilidad Socioeconómica en la Cuenca del Guadalentín. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia, pp 67.
- Gibbs, W.J., 1975. Drought, its definition, delineation and effects. In Drought: Lectures Presented at the 26th Session of the WMO. Report No. 5. WMO, Geneva, pp. 3–30.
- Guiseppe R., Vega T. y Bonaccorso B. 2007. Methods and Tools for Drought Analysis and Management. Water Science and Technology Library. VOLUME 62. *Editorial Advisory Board*.
- Gumbel, E. J., 1963. STATISTICAL FORECAST OF DROUGHTS. International Association of Scientific Hydrology. Bulletin. 8:1, 5-23, DOI: 10.1080/02626666309493293.
- Guttman, N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. J. Am. Water Resour. Assoc. 34 (1), 113–121.
- Guttman, N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. Journal of the American Water Resources Association 35 (2), 311–322.
- Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A., Vanyarkho, O.V., 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society 80 (3), 429–438.
- Heim, R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society 83 (8), 1149–1166.
- Hillier, D., Dempsey, B., 2012. A dangerous delay: the cost of late response to early warnings in the 2011 drought in the Horn of Africa. Oxfam Policy Pract. Agric. Food L 12, 1–34 <https://doi.org/ISBN: 978-1-78077-034-5>.

- INDECI. 2014, Instituto Nacional de Defensa Civil, “*Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres- PLANAGERD 2014 – 2021*”, Perú
- Jackson R. D., y A. R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices, Preventive veterinary medicine, 11, 185-200.
- Jain, S.K., Keshri, R., Goswami, A., Sarkar, A., Chaudhry, A., 2009. Identification of drought-vulnerable areas using NOAA AVHRR data. International Journal of Remote Sensing 30 (10), 2653–2668.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., Goldberg, A., Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., Goldberg, A., 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. J. Clim. 23, 618–633. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>.
- Karnieli, A., Bayasgalan, M., Bayarjargal, Y., Agam, N., Khudulmur, S., Tucker, C.J., 2006. Comments on the use of the vegetation health index over Mongolia. Int. J. Remote Sens. 27, 2017–2024. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160500121727>.
- Klos, R.J., Wang, G.G., Bauerle, W.L., Rieck, J.R., 2009. Drought impact on forest growth and mortality in the southeast USA: an analysis using Forest health and monitoring data. Ecol. Appl. 19, 699–708. <http://dx.doi.org/10.1890/08-0330.1>.
- Kogan, F.N., 1995a. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research 15 (11), 91–100.
- Kogan, F.N., 1995b. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorological Society 76 (5), 655–668.
- Kogan, F.N., 1997. Global drought watch from space. Bull. Am. Meteorol. Soc. 78, 621–636.
- Kogan, F.N., 2001. Operational space technology for global vegetation assessment. Bull. Am. Meteorol. Soc. 82, 1949–1964.
- Kogan, F.N., Yang, B., Wei, G., Zhiyuan, P., Xianfeng, J., 2005. Modelling corn production in China using AVHRR-based vegetation health indices. International Journal of Remote Sensing 26 (11), 2325–2336.
- Kogan, F.N., Salazar, L., Roytman, L., 2012. Forecasting crop production using satellitebased vegetation health indices in Kansas, USA. Int. J. Remote Sens. 33, 2798–2814. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.621464>.
- Linsley Jr., R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., 1958. Hydrology for Engineers. McGraw Hill, New York.

- Liu, W.T., Juarez, R.I.N., 2001. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 22 (17), 3483–3501.
- Liu, W.T., Kogan, F.N., 1996. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing* 17 (14), 2761–2782.
- Lloyd-Hughes B, Saunders M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22, 1571–1592.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 233–236.
- MINAGRI., 2018 [http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult] (Fecha de acceso 17/2018)
- MINAM [<http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/>] (Fecha de acceso 12/2015)
- MINAM., 2011. La Desertificación en el Perú. Cuarta comunidad Nacional del Perú a la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Lima. 74 pp.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2009. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *J. Geophys. Res.* 114, D06120. doi:10.1029/2008JD010986.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391, 202–216.
- Mohan, S., Rangacharya, N.C.V., 1991. A modified method for drought identification. *Hydrological Sci. J.* 36 (1), 11–21.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2006: What is Drought? Understanding and Defining Drought. University of Nebraska-Lincoln.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONURRD). 2012. Impacts of Disasters Since the 1992 Rio de Janeiro Earth Summit. Disponible en: http://www.unisdr.org/files/27162_2012no21.pdf
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1986. Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974–1985, WMO, Geneva, p. 118.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1990. Glossary of terms used in agrometeorology. CAGM No. 40. WMO/TD-No. 391. Geneva.

- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2012. El tiempo, el clima y el agua, motores de nuestro futuro. OMM-N° 1084, 40 p. ISBN: 978-92-31084-2.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.
- PDC – Provincia de Canchis. 2013. Plan de Desarrollo Concertado de la Provincia de Canchis 2013 – 2023. 2013. 22-24.
- Phillips, O.L., Aragao, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C.A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., de Oliveira, A.C.A., Cardozo, N.D., Czimczik, C.I., Feldpausch, T.R., Freitas, M.A., Gloor, E., Higuchi, N., Jiménez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D.A., Nepstad, D., Patiño, S., Peñuela, M.C., Prieto, A., Ramirez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A.S., ter Steege, H., Stropp, J., Vásquez, R., Zelazowski, P., Dávila, E.A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K.-J., Erwin, T., Di Fiore, A., Honorio, E.C., Keeling, H., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Cruz, A.P., Pitman, N.C.A., Vargas, P.N., Ramirez-Angulo, H., Rudas, A., Salamá, R., Silva, N., Terborgh, J., Torres-Lezama, A., 2009. Drought sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science* 323 (80), 1344–1347. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1164033>.
- Pinkayan, S., 1966. Conditional Probabilities of Occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. Hydrol. Paper 12, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Quiring, S.M., Ganesh, S., 2010. Evaluating the utility of the vegetation condition index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agric. For. Meteorol.* 150, 330–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.015>.
- RAE. 2015. Definición de sequía. <http://www.rae.es/> (revisado 01/03/2015)
- Rahman H., y G. Dedieu. 1994., SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurement in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 123-14.
- Rhee, J., Im, J., Carbone, G.J., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 114, 2875–2887.
- Richards, J.A., Jia, X., 2013. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Rivera, Juan Antonio. 2014. Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras. Tesis presentada para optar

al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el Área de la Atmosfera y los Océanos. Buenos Aires-Argentina. Pp 352.

- Rouse J. W. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFCT, Greenbelt, MD, USA, 12.1.1.
- Santos, M. A., 1983. Regional droughts: A stochastic characterization. J. Hydrol., 66:183--211.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I., Portela, M.M., 2010. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. Water Resour. Res. 46, 1–13.
<https://doi.org/10.1029/2009WR008071>
- Secretaría General de las Naciones Unidas, 1994. United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa. Paris.
- SENAMHI. [<http://www.senamhi.gob.pe/>] (Fecha de acceso 06/2018)
- SENAMHI. 2016. Análisis del riesgo de sequía en el sur del Perú. Responsable del estudio: Ing. Fiorella Vega Jácome.
<https://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro2016-0005.pdf>
- SIGMINAM. 2011. Sistema de Información Geografía Del Ministerio del Medio Ambiente. Mapa de Ecorregiones del Perú. Autor: Dr. Antonio Brack Egg.
<http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/maps.aspx>
- Singh, R.P., Roy, S., Kogan, F., 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. International Journal of Remote Sensing 24 (22), 4393–4402.
- <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0143116031000084323?journalCode=tres20#.U6no3fmSx1Y>
- Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). Teledetección. España: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia.pp.19.
- Sun, D., Kafatos, M., 2007. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature related drought indices over North America. Geophys. Res. Lett. 34, L24406. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031485>.
- Taylor, R. 1990. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review, JDMS, 1, 35-39.
- Thom H.C.S. 1958. A note on the Gamma distribution. *Monthly Water Review* 86 vol. 4 117–122.
- Tucker, C., D’Souza, D., 1996. History of the use of AVHRR data for land applications. In: Souza, G.D., Selward, A.S., Malingreau, J.P. (Eds.), *Advances in the Use of NOAA-*

AVHRR Data for Land Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 1–19.

- Udelhoven, T., Stellmes, M., del Barrio, G., Hill, J., 2009. Assessment of rainfall and NDVI anomalies in Spain (1989–1999) using distributed lag models. *International Journal of Remote Sensing* 30 (8), 1961–1976.
- [http://www.researchgate.net/publication/248978109_Assessment_of_rainfall_and_N_DVI_anomalies_in_Spain_\(1989-1999\)_using_distributed_lag_models](http://www.researchgate.net/publication/248978109_Assessment_of_rainfall_and_N_DVI_anomalies_in_Spain_(1989-1999)_using_distributed_lag_models)
- UNCCD, 2000. *An introduction to the United Nations Convention to combat desertification* (available at <http://www.unccd.int>).
- Unganai, L.S., Kogan, F.N., 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* 63 (3), 219–232.
- Vicente-Serrano, S.M., 2007. Evaluating the impact of drought using remote sensing in a Mediterranean, semi-arid region. *Natural Hazards* 40 (1), 173–208.
- http://www.researchgate.net/publication/226088113_Evaluating_the_Impact_of_Drought_Using_Remote_Sensing_in_a_Mediterranean_Semi-arid_Region
- Vogel, R.M., Kroll, C.N., 1992. Regional geohydrologic–geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resour. Res.* 28 (9), 2451–2458.
- Wang, J., Price, K.P., Rich, P.M., 2001. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing* 22 (18), 3827–3844.
- Wan, Z. 1999. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD): Version 3.3. Santa Barbara: University of California.
- Wan, Z., Dozier, J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving landsurface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34 (4), 892–905.
- http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=508406&abstractAccess=no&userType=inst
- Webster, K.E., Kratz, T.M., Bowser, C.J., Adagnuson, J.J. 1996. The influence of landscape position on lake chemical responses to drought in Northern Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* 41 (5): 977-984.
- White, D.H., Walcott, J.J. 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science* 60: 599-616.
- Wilhite, D.A., Glantz, M. H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. Paper 20. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20>

- Wilhite, D.A., Svoboda, M.D. 2000. Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. En: Wilhite, D.A, Sivakumar, W., Wood, D.A (eds.). *Proceedings of an expert group meeting in Early Warning Systems for drought preparedness and drought management*.
- Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., 2007. Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resour. Manag.* 21, 763–774. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9076-5>.
- Wilks, D.S. 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Third edition ACADEMIC PRESS.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., Khan, F.I., 2011. A review of drought indices. *Environ. Rev.* 19, 333–349. <http://dx.doi.org/10.1139/a11-013>.
- Zecharias, Y.B., Brutsaert, W., 1988. The influence of basin morphology on groundwater outflow. *Water Resour. Res.* 24 (10), 1645–1650.
- Zelenhasic, E., Salvai, A., 1987. A method of streamflow analysis. *Water Resour. Res.* 23, 156–168.
- Zhao, M.S., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329 (5994), 940–943.